第 49 卷第 11 期
2021 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 11
November，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210213

综 合 评 述

3D 打印纤维增强混凝土材料研究进展

叶俊宏[1]，郑 怡[2]，余江滔[1,2,3]，俞可权[1,3]，董方园[1]，肖建庄[1,3]

(1. 同济大学土木工程学院，上海 200092；2. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 武汉 430000；
3. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室，上海 200092)

摘 要：混凝土 3D 打印是一种基于三维建筑模型的快速成型技术。由于无需模具、劳动力需求低、施工速度快等特点，3D 打印在近 10 年里受到了越来越多的关注。纤维增强混凝土具备传统混凝土的可塑性和成本优势，同时具有优异的抗拉性能和裂缝控制能力，因此 3D 打印纤维增强混凝土也成为了世界范围内的研究重点之一。主要从可打印纤维增强混凝土材料、打印中的工作性能和硬化后的力学性能 3 个方面详细介绍了 3D 打印纤维增强混凝土的国内外研究现状，并讨论了 3D 打印纤维增强混凝土未来发展的机遇以及所面临的挑战。

关键词：3D 打印；纤维增强混凝土；工作性能；力学性能
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)11–2538–11
网络出版时间：2021–10–11

Research Progress on 3D Printable Fiber Reinforced Concrete

YE Junhong[1], *ZHENG Yi*[2], *YU Jiangtao*[1,2,3], *YU Kequan*[1,3], *DONG Fangyuan*[1], *XIAO Jianzhuang*[1,3]
(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430000, China; 3. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: 3D concrete printing is a rapid prototyping technology based on 3-dimensional building information model. 3D printing has attracted more attention in the latest decade due to its none-framework, low labor cost and quick construction. Fiber reinforced concrete (FRC) possesses a superior tensile property, a crack control ability, and some advantages in shapeability and cost control as conventional concrete. 3D-FRC printing thus becomes a hot research topic. Review, recent development on 3D-FRC printing was comprehensively represented, including, category of 3D printable FRC, workability of 3D printable FRC during printing and their mechanical property in hardened state. In addition, the future opportunities and current challenges in 3D printable FRC technology were also discussed.

Keywords: three-dimensional printing; fiber reinforced concrete; workability; mechanical property

由于人口老龄化问题不断凸显，劳动力短缺和劳动力成本过高已然成为我国建筑行业面临的主要挑战，为此研究者们不断地进行创新和设计，尝试开发更先进的施工技术。由于施工速度快、劳动成本低、无需模板以及适用于各类施工场地等优点，混凝土 3D 打印技术应运而生，受到了工程界的广泛关注[1]。

混凝土 3D 打印，也称混凝土“增材建造”，是一种建立在三维建筑模型上的快速成型技术。它集成了计算机、数控、逆向工程、材料科学、机械工程等技术，以“分层制造，逐层叠加”为基本原理，由计算机获取三维建筑模型的形状尺寸等

收稿日期：2021–03–30。　修订日期：2021–04–23。
基金项目：国家自然科学基金面上项目(51778461，21978504)；上海市科学技术委员会科研计划项目(19DZ1202500)。
第一作者：叶俊宏(1995—)，男，博士研究生。
通信作者：余江滔(1975—)，男，博士，教授。

Received date: 2021–03–30.　**Revised date:** 2021–04–23.
First author: YE Junhong (1995–), male, Doctoral candidate.
E-mail: 1710745@tongji.edu.cn
Correspondent author: YU Jiangtao (1975–), male, Ph. D., Professor.
E-mail: yujiangtao@tongji.edu.cn

相关信息，经切片处理、检验、修正后生成正确的数控程序，并以此控制机械装置按照指定路径运动实现建筑物空间形态输出而完成自动建造过程[2]。

挤出型(extrusion-based)3D 打印是目前较为成熟的混凝土打印技术。顾名思义，该技术是将新拌和的混凝土材料通过特定挤出装置，直接从打印喷嘴均匀挤出，随着打印喷嘴的匀速行进逐层堆叠成型[3–4]。相比传统支模成型的施工工艺，3D 打印技术对混凝土材料配合比设计要求更高：混凝土材料需在新拌和状态下具有良好的流变特性以满足可打印要求；由于 3D 打印逐层堆叠、无模板成型的施工工艺，可打印混凝土材料还需具有良好的早期强度以维持挤出后的形状[5]。然而，普通混凝土材料存在抗拉性能差的先天弱点，必须配合钢筋的使用才能应用于建筑结构。为此，研究者们尝试在打印后在空腔中浇筑钢筋混凝土[6]，或在 3D 打印过程中同步布置钢筋网[7]和微筋[8]，甚至同步打印钢筋[9]来保证结构强度和延性，但这无疑削减了 3D 打印带来的施工便利以及低成本特性。

随着人们对新型混凝土材料的不断探索，发现向混凝土中掺入短切纤维可以改善其力学性能，有效地提升材料的抗拉和抗裂性能，降低材料的脆性[10]。因此，纤维增强混凝土也成为了土木工程界当下的研究热点。然而，关于 3D 打印纤维增强混凝土的研究在世界范围内仍处于起步阶段，在材料设计、打印工艺流程、力学性能等方面还存在许多亟待解决的难题。基于此，从可打印纤维增强混凝土材料、打印工作性能和打印后力学性能 3 个方面着手，剖析了该领域目前国内外的研究现状，并讨论了当前仍存在的技术难题以及未来的发展趋势。

1　可打印纤维增强混凝土材料

纤维增强混凝土的原材料选用对其打印性能有着至关重要的影响。研究者们通常掺入纳米黏土、羟丙基甲基纤维素(HPMC)、减水剂等外加剂来调节打印材料的流动性，使其能够连续地进行泵送并从打印喷嘴挤出。此外，纤维的种类、长度、掺量不仅决定了材料打印硬化后的力学性能，对其打印性能也有重要影响。过多的纤维会使材料的流动性能下降，可能导致泵送和打印过程出现间断甚至阻塞。目前用于可打印纤维增强混凝土材料的纤维种类繁多，主要有玄武岩纤维(Basalt)、玻璃纤维(Glass)、聚乙烯醇纤维(PVA)、聚乙烯纤维(PE)、聚丙烯纤维(PP)、钢纤维(Steel)等。表 1 总结了近些年来 13 种典型的可打印纤维混凝土的原材料组成以及纤维长度和掺量。

Hambach 等[11]在混凝土中添加经过表面氧化处理后的碳纤维，形成了一种抗压强度高达 87.4 MPa 的可打印碳纤维增强混凝土材料。Panda 等[12]发明了一种用于 3D 打印的玻璃纤维地质聚合物材料，同时研究了不同纤维长度对和掺量对其抗压、抗拉、抗弯强度的影响。Wang 等[13]发现了一种可打印玄武岩纤维增强混凝土，并对打印后的力学性能的各向异性进行了详细研究。Ding 等[14]向普通混凝土中掺入 6 mm 和 12 mm 的 PE 纤维，形了成一种适用于 3D 打印的 PE 纤维增强混凝土，并研究了纤维掺量对其不同加载方向下抗弯性能的影响。Nematollahi 等[15]使用 6 mm 的 PP 纤维，研制出了面向 3D 打印的 PP 纤维增强混凝土，该材料在新拌和状态下具有良好的成型能力。

工程化水泥基复合材料(如 ECC，超高延性水泥基复合材料)具有超过 3%的极限拉伸应变能力[16]，是最适用于 3D 打印的材料之一。Soltan 等[17]和 Bao 等[18]通过在混凝土基体中添加铝酸盐水泥、纳米黏土和 HPMC 来提升材料的可打印性能和成型性能，同时掺入长度 12 mm 和 8 mm、体积比 2.0%的 PVA 纤维，研制出了抗拉强度 3~5 MPa、拉伸延性 2.0%~3.8%的快硬性可打印 PVA-ECC 材料。随后，Leung 等[19]在不添加快硬水泥的情况下，研制出了拉伸延性可达到 5.13%的可打印 PVA-ECC 材料。Figueiredo 等[20–21]通过掺入高炉矿渣，将可打印 PVA-ECC 材料的抗压强度提升至 44 MPa。2018 年，Mechtcherine 等[22]使用长度为 6 mm 的 PE 纤维，研制了一种更低纤维掺量的可打印 PE-ECC 材料，发现在纤维体积掺量为 0.3%～1.5%时，其打印后的拉伸延性为 0.88%～3.21%。2019 年，Pan 等[23]使用长度为 12 mm 的 PE 纤维，同时添加硫铝酸盐水泥、HPMC 和纳米黏土来提高 ECC 材料的打印性能，研究出了拉伸延性可达 11%的 PE-ECC 材料。2021 年，Yu 等[24–25]使用橡胶粉替代 40%体积的石英砂，公开了一种拉伸延性可达 7.54%的绿色环保型 PE-ECC 材料。

超高性能混凝土(UHPC)具有超高的抗压强度，在混凝土 3D 打印界也受到了广泛的关注。但 UHPC 通常采用钢纤维作为增强材料，对打印设备的性能要求更高，因此目前面向 3D 打印的 UHPC 研究相

对较少。Nematollahi 等[26–27]和 Tran 等[28]使用钢纤维发明了一种抗压强度高达 70～150 MPa 的可打印 UHPC 材料，并研究了不同纤维长度和掺量对其打印后力学性能的影响。

表 1 3D 打印纤维增强混凝土原材料组成及其力学性能

Table 1 Composition and mechanical property of 3D printed fiber reinforced concrete

Author	Materials	Fiber category, length, content	Spreading diameter/mm	Compressive strength/MPa	Tensile strength/MPa	Tensile strain capacity/%	Flexural strength/MPa
Hambach[11]	Cement, silica fume, water reducer	Carbon, 3 mm		83.8–87.4			20.3–119.6
Panda[12]	Fly ash, slag, micro silica, fine sand, liquid potassium, HPMC	Glass, 3/6/8 mm, 0.25%–1.00%		20–27	0.9–1.5		2.6–7.0
Wang[13]	Cement, silica fume, fly ash, silica sand	Basalt, 18 mm, 0–0.7% (mass fraction)		29.8–39.6	3.02–5.26 (splitting strength)		3.34–6.51
Ding[14]	Cement, silica sand, HPMC	PE, 6/12 mm, 0–1.4%					2.13–15.09
Nematollahi[15]	Fly ash, silica sand, alkaline solution, sodium carboxymethyl cellulose powder	PP, 6 mm, 0.25%–1.00%	134–158	13.5–35.8			6.1–8.1
Soltan[17]	Calcium aluminate cement, fly ash, microsilica, silica flour, nanoclay, HPMC	PVA, 12 mm, 2%		23–30	3.4–5.0	2.0–3.8	
Bao[18]	Calcium aluminate cement, fly ash microsilica, silica flour, nanoclay, HPMC	PVA, 8 mm, 2%		24.2	4.7	2.4	10.8
Leung[19]	Cement, fly ash, silica sand, HPMC	PVA, 12 mm, 2%		16.45–19.23	1.60–3.54	1.00–5.13	
Figueiredo[20–21]	Cement, fly ash, limestone powder, slag, silica sand	PVA, 8 mm, 2%		34.98–44.09	1.64–2.41	0.15–0.31	4–8
Mechtcherine[22]	Cement, silica fume, fly ash, micro silica	PE, 6 mm, 0.3%–1.5%	133–153		5.32–5.66	0.88–3.21	
Pan[23]	Cement, fly ash, sand, HPMC, nanoclay, water reducer	PE, 12 mm, 1.0%–2.0%	155–176		4.67–5.68	3.57–11.43	3.2–19.4
Yu[24–25]	Cement, sulfoaluminate cement, fly ash, silica fume, sand, crumb rubber, HPMC, water reducer	PE, 12 mm, 1.0%–2.0%	144–169	36.7–53.4	4.51–4.79	4.38–7.54	14.4–22.0
Nematollahi[26–27], Tran[28]	Cement, silica fume, aggregate, slag, HPMC, retarder	Steel, 3/6/13 mm, 0.25%–2.00%	144	70–156			6–16

Note: Fiber content in this table refers to volume fraction unless stated.

2 纤维增强混凝土材料打印工作性能

2.1 打印流程和设备

在混凝土 3D 打印中，除了材料配比外，打印流程和打印设备同样是影响施工效率和施工质量的关键因素。混凝土 3D 打印施工流程主要包含了搅拌、泵送、传输、挤出、建造、养护和硬化 7 个步骤。为实现连续的打印施工，新拌和好的混凝土材料通常是通过连接到泵送装置的管道传输到打印设备中，然后通过挤出装置挤出成型。目前，常见的混凝土 3D 打印设备主要有龙门架式和机械臂式[29]。前者的优点在于可用于大规模的混凝土结构打印，但

是移动困难，而后者则是便于移动，适用于小规模个性化的混凝土结构打印。对于普通无纤维混凝土材料打印，材料配比是关键，而对纤维增强混凝土材料来说，打印设备中的挤出装置类型对其打印后的外观形貌和力学性能有至关重要的作用。首先，挤出装置类型可能引起纤维在挤出过程的扭转、缠绕和结团，影响其打印效率和外观形貌；其次，挤出过程还可能造成混凝土内部的纤维重分布，而纤维分布对纤维增强混凝土打印后的力学性能有显著的影响[24]。

目前，通常采用的挤出装置有螺旋式[30]、空腔式[31]和活塞式[22] 3 种类型。螺旋式挤出，即通过带有螺旋叶片的螺杆的自转，将混凝土材料泵送到打印喷嘴并挤出。对于 PE 等偏柔性纤维，螺旋式挤出可能会造成纤维的旋转和缠绕现象。Yu 等[24–25]的试验结果表明，使用螺旋式挤出的 PE-ECC 试件的抗拉强度和延性较传统浇筑成型的试件均有所下降。空腔式挤出，是通过螺杆的旋转带来空腔容积的变化，从而将混凝土材料挤压至打印喷嘴，这一过程相比于螺旋式挤出对纤维混凝土内部的纤维重分布影响更小[31]。活塞式挤出，则是通过活塞直接将混凝土材料挤压至打印喷嘴，对纤维分布几乎没有影响，打印出的纤维混凝土也更加密实[15,22]。对于碳纤维[11]、玄武岩纤维[13]、钢纤维[27]等，由于纤维自身刚度较大，螺杆的旋转并不会对纤维引起明显的旋转和缠绕。相反，由于喷嘴尺寸的限制，从打印喷嘴挤出后混凝土材料内部纤维分布方向会更加一致[11,13,27,32–34]。这一结论对于空腔式和活塞式挤出同样适用。从对纤维分布影响程度的角度来看，活塞式挤出是最佳选择。但活塞一次行进路程有限，一次挤压打印出混凝土体积也有限。如何实现连续不间断的打印，是这一类挤出装置需要解决的关键性难题。

2.2　打印喷嘴

打印喷嘴的形状是影响纤维增强混凝土打印形貌的关键因素。目前研究者们常采用的形状有圆形和方形[24]。通常情况下，打印出单条混凝土的高度是由喷嘴抬升高度决定的，而其宽度是由喷嘴尺寸决定的。对于圆形喷嘴来说，只需要具有 X、Y、Z 3 个方向的移动自由度(X、Y 为水平方向，Z 为垂直方向)，即可保证打印出混凝土宽度的一致。对于方形喷嘴来说，还需要再添加 1 个轴向自由度，才能保证在水平面内各向移动时混凝土宽度的一致，对打印设备要求较高。然而，圆形喷嘴往往会在打印过程中带来不可避免的空隙，同时其打印外表面不平整，如图 1 所示。而方形喷嘴则不存在这一现象，并且其打印外观形貌更为精确。

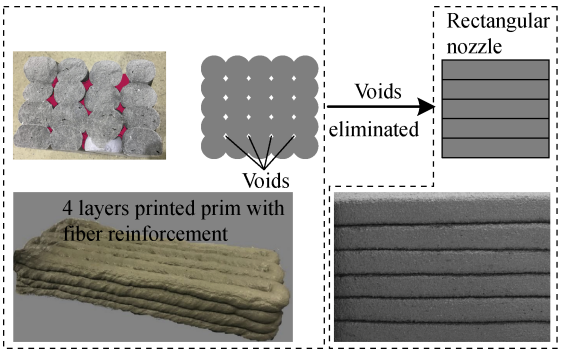


图 1　喷嘴形状对打印形貌的影响[24,26,36]

Fig. 1　Influence of nozzle shape the printing morphology[24,26,36]

2.3　可打印性和可建造性

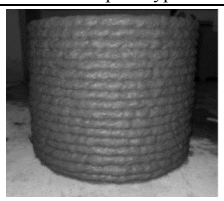
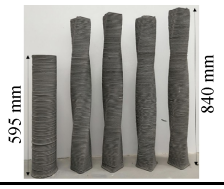
可打印性是指新拌和的混凝土能够连续均一地从打印喷嘴中被挤出的性能。而混凝土材料的流动性是评估其可打印性能的关键参数。一方面，研究者们多采用跳桌试验来测量可打印混凝土的流动性，表 1 中列举了各类 3D 打印纤维增强混凝土材料的跳桌流动度。另一方面，研究者常采用挤出试验来评价混凝土的可打印性能。Nematollahi 等[26]使用 30 mm×15 mm 的喷嘴连续挤出了 5 根长 250 mm 的单层 UHPC。在整个打印过程中未发现堵塞、不连续等现象，表明研制出 UHPC 材料具有良好的可打印性[26]。Shakor 等[35]研究了玻璃纤维增强混凝土材料在不同打印速率下的可打印性能，发现挤出单条混凝土的宽度和质量随着打印速率的增加呈减小的趋势。Chen 等[36]通过测量打印试件在 X、Y、Z 3 个方向的变形评价了 PVA 和 PP 纤维增强硫铝酸钙混凝土的可打印性能，试验结果表明打印试件的各向变形随着材料流动性能的下降而减小，即呈现出更好的成型性能。

可建造性是打印后的结构在硬化前能够维持自身稳定不发生坍塌失效的能力。主要包括材料失效和结构稳定性失效 2 种类型[37]。前者取决于新拌和混凝土自身的流变特性，后者则取决于打印结构的结构特征，如长细比。这些特性决定了 3D 打印的具体施工工艺参数以及单次连续施工的最大高度，进一步决定了 3D 打印技术的施工效率。表 2 总结了 4 种纤维增强混凝土材料的可建造性测试。Pan 等[21]利用螺旋挤出式圆形喷嘴(直径 20 mm)打印了高 219.2 mm 的 17 层空心圆柱结构，相比于 221.0 mm

的设计打印高度下降了 1.8 mm。Wang 等[38]通过在 PVA-ECC 中掺入多壁碳纳米管来提升其可建造性，并打印出了 18 层总高为 170 mm 的空心圆柱结构，相比于 180 mm 的设计打印高度下降了 10 mm。Yu 等[23]利用螺旋挤出式方形喷嘴(100 mm×10 mm)打印出了 20 层总高为 195 mm 的小墙，相比 200 mm 设计打印高度下降了 5 mm。为了进一步提升打印高度，Li 等[37]和 Arunnothayan 等[28]采用了扭转上升式结构，打印出了高近 1500 mm 的 PE-ECC 结构和 840 mm 的 UHPC 结构。

表 2 纤维增强混凝土材料的可建造性

Table 2 Buildability for 3D printable fiber reinforced concrete

Author	Material	Printer	Printed prototype
Pan[23]	PE-ECC	Gantry-type printer Screw pump Circle nozzle	
Wang[38]	PVC-ECC	Gantry-type printer Screw pump Circle nozzle	
Yu[25]	PE-ECC	Gantry-type printer Screw pump Rectangular nozzle	
Li[29]	PE-ECC	Printer with robot arm Cavity pump Rectangular nozzle	
Sanjayan[28]	UHPC	Gantry-type printer Screw pump Circle nozzle	

3 纤维增强混凝土材料打印后力学性能

3.1 早期性能

在混凝土 3D 打印中，材料的早期性能同样十分重要。一方面由于 3D 打印逐层堆叠的施工工艺，下部混凝土层要比上部混凝土层在早期承受更大的荷载，受到挤压后的混凝土层能够维持自身形状不发生变形的能力称为抗形变能力(shape-retention ability)[15]。抗形变能力是上文所述的打印结构不发生材料失效的关键因素。Nematollahi 等[26]通过向直径 60 mm、高 60 mm 的 UHPC 圆柱体上放置重物并观测其垂直变形来定量评价可打印 UHPC 的抗形变能力。当重物质量小于 1.08 kg 时，UHPC 圆柱均无明显变形。另一种类似的方法是向混凝土圆台体上

放置 600 g 的重物，并观测其 1 min 后水平面内的扩展直径[15]。Nematollahi 等[15]测得不同掺量下 PP 纤维增强混凝土的扩展直径为 112～124 mm，并随着纤维掺量的增加而下降。Li 等[31]测量了 PVA-ECC 在不同静置时间(从搅拌到试验的时间间隔)下的扩展直径，试验结果显示在静置时间不超过 70 min 的情况下，PVA-ECC 具有良好的可打印性和抗形变能力，其扩展直径为 100～106 mm。

另一方面，由于 3D 打印无模板的施工工艺，打印混凝土结构会长期暴露在空气中，混凝土表面和内部水分蒸发较快，容易出现干缩现象。对于 3D 打印普通混凝土材料已经有相关研究者对其早期的塑性干缩进行了详细研究[39]。最近，还有研究者发明了高速成像技术用于观测 3D 打印混凝土的早期形变并进行施工参数优化[40]。目前针对纤维混凝土的相关研究还是空白。尽管如此，在传统建筑领域中，纤维仍被看着是对纤维混凝土材料早期力学性能有积极的贡献，纤维与基体之间的桥联作用可以弥合干缩引起的裂缝，限制其发展，进而影响整个打印结构的力学性能[37]。

3.2　硬化后基本力学性能

3D 打印纤维增强混凝土用于实际工程的另一关键因素则在于其力学性能，主要包括了抗压强度、抗拉强度、拉伸延性以及抗弯强度。图 2 和表 1 总结了目前各种 3D 打印纤维增强混凝土材料的各项基本力学性能。从其中抗拉性能较突出是 Pan 等[23]和 Yu 等[24–25]发明的可打印 PE-ECC 材料，其抗拉强度分别在 4.67～5.68 MPa 和 4.51～4.79 MPa，拉伸延性分别在 3.57%～11.43%和 4.38%～7.54%。从图 2 可以看出，掺入纤维后 3D 打印混凝土的抗压和抗弯强度较普通混凝土均有明显提升。抗压强度最高的是 Nematollahi 等[26]研制可打印 UHPC 材料，最高达 156 MPa。Hambach 等[11]通过改变喷嘴形状，实现了碳纤维在打印过程中定向分布。当纤维体积掺量为 1.0%时，未经定向处理的 3D 打印碳纤维混凝土抗弯强度为 20.3 MPa，经过定向处理后其抗弯强度达到了 46.5 MPa；当提升纤维掺量至 3%且经过定向处理后，其打印后抗弯强度高达 119.6 MPa。

除此之外，3D 打印逐层堆叠的施工工艺可能形成薄弱的层间界面，并进一步带来力学性能各向异性的问题。以抗弯试验为例，并以打印行进方向为参考，试验力的加载方向有如图 3 所示的 X、Y、Z 3 个方向。显然，当加载方向平行与层间界面时(X 向)，由于层间粘接差，力学性能薄弱，其抗弯强度也必然最小，各向异性由此产生。

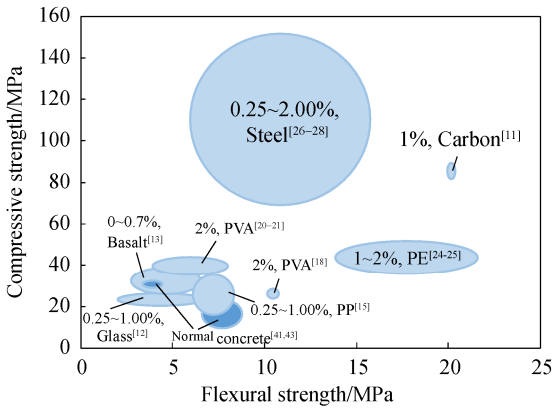


图 2　纤维对 3D 打印混凝土力学性能的影响

Fig. 2　Influence of fiber on mechanical property of 3D printed concrete

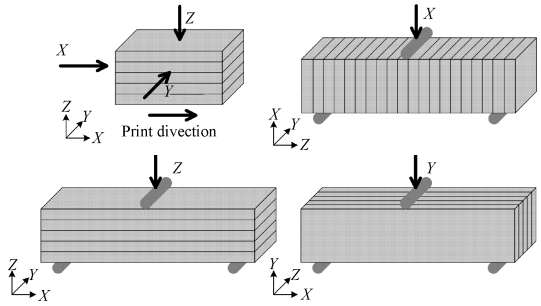


图 3　3D 打印混凝土各向异性

Fig. 3　Anisotropy in 3D printed concrete

Panda 等[12]的试验结果表明，玻璃纤维增强混凝土材料在 X 向的抗压强度明显大于 Y、Z 向，抗弯强度在 Z 向最大。当打印试件 Z 向受拉时，荷载与薄弱的层间界面垂直，因此 Z 向的抗拉强度最低，这实际上主要是由其层间粘接强度决定的。Ding 等[14]研究了 6 mm 和 12 mm 2 种纤维长度、0～1.4%范围内 5 种纤维体积掺量下，3D 打印 PE 纤维增强混凝土在弯曲荷载下的各向异性。结果表明打印试件的抗弯强度在 Y、Z 向无明显差异，但在 X 向明显低于 Y、Z 向，这同样是由于层间粘接性能弱造成的。Wang 等[13]对 3D 打印玄武岩纤维增强混凝土试件进行了不同加载方向下轴压、劈拉、弯曲和剪切 4 个方面的试验，结果表明打印试件的最大劈拉、抗弯和抗剪强度均出现在 Z 向，最大抗压强度出现在 X 向。Wang 等[13]还提出经验公式来定量评价打印试件的各向异性：

$$I_a = \sqrt{(f_x - f_{mc})^2 + (f_y - f_{mc})^2 + (f_z - f_{mc})^2} \,/\, f_{mc} \quad (1)$$

式中：I_a 是各向异性系数；f_{mc} 表示采用浇筑成型(mold-cast)的混凝土材料的力学性能指标；f_X、f_Y、f_Z 分别为材料打印后 X、Y、Z 向的力学性能指标。I_a 值越小，表示材料打印后的各向异性越小，其值为 0 时则表示材料打印后无各向异性现象。

Wang 等[13]测得 3D 打印玄武岩增强纤维混凝土抗压、劈拉、抗弯和抗剪强度的各向异性系数分别为 0.25，0.46，0.63 和 0.68。Yu 等[24–25]对掺有橡胶粉末的 PE-ECC 材料打印后抗压、抗弯和抗剪各向力学性能进行了详细研究。结果表明，打印试件的抗压强度在 Z 向最大，Y 向和 Z 向抗弯和抗剪强度无明显差别，但 Z 向的压缩和弯曲耗能能力较 X、Y 向以及浇筑成型试件均有提升。参照式(1)，Yu 等[24–25]测得 3D 打印 PE-ECC 材料抗压、抗弯和抗剪强度的各向异性系数分别为 0.19，0.06 和 0.30。

3.3 尺寸效应

混凝土中粗细集料、水泥、外加剂等各类组分的不均匀分布，使得混凝土具有力学性能非线性行为，属于准脆性材料的范畴。因此，随试件尺寸的增大，混凝土材料的力学性能往往不再保持常数。以 Weibull 理论为例，混凝土材料的强度取决其内部最小材料单元的强度，随着试件尺寸增大，该单元出现的概率也逐渐增加，混凝土的强度随之减小，该现象即为混凝土的尺寸效应[41]。

因此，研究 3D 打印纤维增强混凝土的尺寸效应对于打印大尺度结构的合理设计具有重要工程指导意义。Yu 等[42]先采用浇筑成型制作了一批缝高比为 0.34、0.40，梁高为 40～150 mm 的 PE-ECC 缺口梁(纤维掺量 0、1.0%、2.0%)，随后又打印了一批缝高比为 0.34，梁高为 60～500 mm 的 PE-ECC 缺口梁(纤维掺量 1.5%)，通过三点弯曲试验研究了浇筑型和打印型 PE-ECC 的尺寸效应。试验结果与 Bažant 基于非线性断裂力学提出的通用尺寸效应律吻合良好。如图 4 所示，试验结果越远离纵轴表示材料的尺寸效应越明显。浇筑型基体和 1.0%PE-ECC 试件呈现典型的脆性破坏，尺寸效应明显。而 3D 打印 1.5%PE-ECC 和浇筑型 2.0%PE-ECC 试件在主裂缝附近均开展出了细密裂缝，呈延性破坏，尺寸效应也明显小于前两者。

3.4 层间粘接性能

由于 3D 打印堆叠成型的特殊施工工艺，相邻打印层间往往容易形成薄弱界面，层间粘接性能成为了影响打印试件力学性能的关键因素。Sanjayan 等[43]制作了 50 mm×25 mm×30 mm 的双层矩形试块，并在层间预切 5 mm 的切口，通过直接拉伸试验测量了普通混凝土的层间粘接强度仅为 0.65 MPa。如何提升层间粘接强度也成为了当下混凝土 3D 打印的研究热点。Zareiyan 等[44]通过在层间设置凸起形成自锁效应来增强层间粘接。Marchment 等[45]则是通过插入钢筋来增强层间粘接，如表 3 所示。但这无疑又削减了 3D 打印带来的施工便利性。

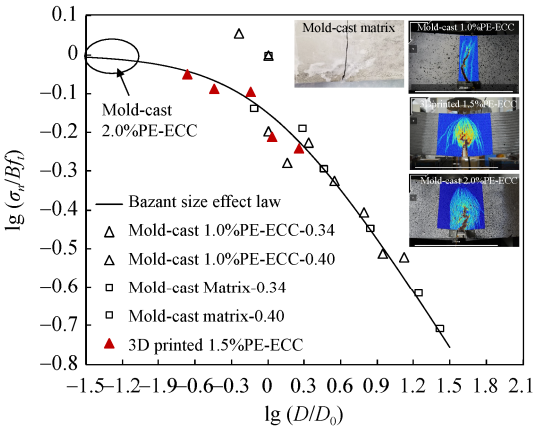


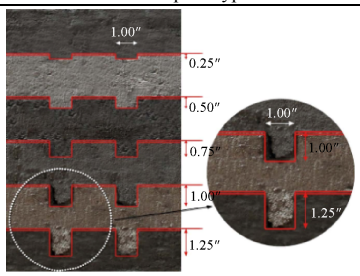
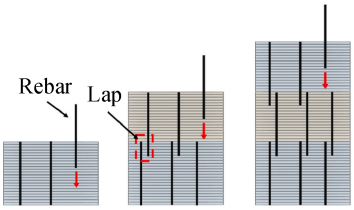
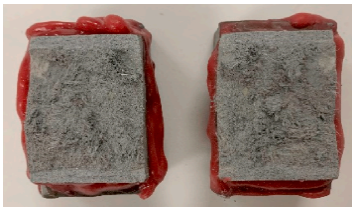
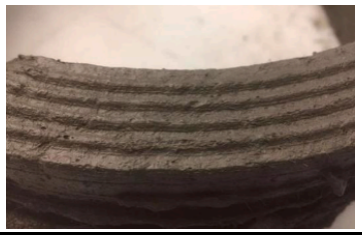
图 4 浇筑型和 3D 打印 PE-ECC 的尺寸效应[42]

Fig. 4 Size effect of mold-cast and 3D printed PE-ECC[42]

对于纤维增强混凝土材料来说，纤维的类型对其层间粘接性能具有至关重要的影响。刘致远等[46]测得玻璃纤维增强混凝土材料的层间粘接强度明显低于无纤维混凝土。其原因在于玻璃纤维与前文所述的钢纤维等类似，自身刚度较大，在打印过程中受喷嘴尺寸限制发生了定向分布，其取向平行于层间界面。纤维在层间界面未起到桥接作用。而对 PE、PP 等偏柔性纤维，在打印过程难以实现定向分布。混凝土材料内部的纤维可以在层间形成桥接作用[24]，可以达到提升层间粘接的作用。Yu 等[24]测得 PE-ECC 打印试件的粘接强度为 1.36 MPa，Nematollahi 等[15]测得 PP 纤维增强地聚合物打印试件的粘接强度为 1.7～3.1 MPa。Le 等[47]测得 PP 纤维增强混凝土的层间粘接强度为 2.3 MPa，并随着层间打印时间间隔增加而降低，当间隔时间为 7 d 时，其粘接强度依然达到了 0.7 MPa。Li 等[31]参照 Zarejyan 的方法在 PE-ECC 层间设置凸起，进一步地增强了 3D 打印 PE-ECC 的层间粘接性能，并对其界面断裂性能进行了详细研究，结果表明层间凸起形成的自锁效应有效地抑制了由于堆叠成型工艺带来的分层剥离失效。

表 3　层间粘接性能提升方法

Table 3　Method for enhancing interlayer bond property

Author	Enhancing Method	Printed prototype
Zareiyan[45]	Bond strength enhancement by interlocking	
Marchment[46]	Reinforcing bar penetrations	
Yu[24]	Fiber bridging between adjacent layers	
Li[32]	Grooved surface	

4　存在的机遇和挑战

与传统浇筑成型的施工技术相比，3D 打印具有无模板施工以及快速成型等的特点，且与纤维增强混凝土的结合还可以满足人们对各类个性化建筑的需求，例如仿生[48–51]，异型曲面[52–54]、拓扑优化[55–58]等特殊结构。

在仿生学的角度上，分层堆叠结构是一种比浇筑整体结构更合理的结构形式[48–51]。贝壳珍珠母的主要由典型的脆性材料文石($CaCO_3$)组成，但通过多级有序的组装，低强低韧的文石却变成一种超强、超韧的“超级材料”。文石层间的矿物桥、纳米粗糙颗粒、聚合物等结构，使得贝壳在荷载作用下出现了裂缝偏转和分叉等现象，避免了单一裂缝的脆性破坏形式[51]。而 3D 打印的堆叠成型工艺正好与贝壳珍珠母的微观分层组装具有一定的相似性。Yu 等[50]使用 PE-ECC 作为原材料，通过在层间间隔放置 PVC 薄膜来实现桥接与分隔，打印出了抗弯强度达 15 MPa，极限挠跨比超过 1/20 的无筋仿生梁结构。因此，合理地选用纤维混凝土材料以及组装形式反而可以将分层堆叠这一劣势变为 3D 打印的优势。

此外，普通混凝土材料的脆性以及施工过程中支模和脱模工序一直是限制大跨度曲面异型混凝土结构发展的两大难题。一方面，纤维增强混凝土具有优异的抗拉性能和抗裂性能，相比传统混凝土材料更适用于曲面异型结构。另一方面，由于 3D 打印的无模板施工工艺还可以省去支模和脱模两道工序，施工更为简便。因此，纤维混凝土的 3D 打印更适用于悬臂[52]、大跨度[53]、曲面[54]等异型结构的建造。

拓扑优化是根据结构的负荷情况，对其结构区域内的材料分布进行优化，可以有效提升材料力学性能的利用率。拓扑优化结构同样属于异型结构，传统的支模脱模工艺难以满足其结构特殊性。3D 打印的无模板施工工艺正好可以解决这一难题[58]。同时，通过拓扑优化还可以有效节省材料用量，降低

制造成本。

3D 打印纤维增强混凝土具有广阔的前景，但目前这一技术仍处于起步阶段，还面临着诸多亟待解决的难题。

1) 纤维

目前市面上的纤维类型、规格和尺寸繁多，学者们目前研究较多的有碳纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维、聚乙烯纤维、聚丙烯纤维、聚乙烯醇纤维和钢纤维等。其中钢纤维对混凝土材料的抗压强度的提升最为显著，且成本较低，但钢纤维混凝土的抗拉延性差。聚乙烯和聚乙烯醇等化学纤维则可以大幅度提升混凝土材料的抗拉延性，但是其成本却比钢纤维高。如何更好地权衡力学性能和纤维成本，仍有待深入研究。另外，纤维与混凝土基体的力学相容性、打印前纤维的可搅拌性、打印后纤维的分散性、以及使用期间内纤维的耐久性等都问题是未来该领域的研究重点。

2) 力学性能

3D 打印混凝土材料的早期性能是影响打印效率和质量的一个重要因素。良好的早期成型性能有利于连续打印施工，同时材料早期的抗干缩能力也会影响结构后期的使用性能。此外，分层堆叠的施工工艺还会带来层间粘接性能弱和各向异性的力学特性，打印结构的耐久性问题会直接影响其使用寿命。目前这些相关方面的研究依旧缺乏。

3) 打印工艺和设备

打印施工工艺和设备是影响 3D 打印纤维混凝土性能的重要因素。材料从搅拌均匀到挤出成型的时间间隔、相邻层的打印时间间隔等工艺参数对材料的打印工作性能和打印结构的力学性能都有显著的影响。螺旋式挤出、空腔式挤出、活塞式挤出以及喷嘴尺寸形状等设备类型对纤维在混凝土基体内的分布也有显著影响。此外，如何优化搅拌和供料系统进行连续打印也是实现大型纤维增强混凝土结构打印的关键问题。探索适用于纤维增强混凝土的施工工艺参数和设备类型还需要系统性的研究。

4) 技术标准

目前国内外从事 3D 打印的企业和研究机构数量众多，但各个企业和机构采用的设备和工艺不尽相同。想要实现 3D 打印纤维增强混凝土的实际工程应用，统一的行业标准和规范是必不可少的，例如材料打印后材料性能的测试方法、取值标准、离散性控制等。目前已有少量关于 3D 打印普通混凝土的试验规范，但是关于 3D 打印纤维增强混凝土的施工标准、设计和试验规范等仍然缺乏。

5 结论

针对目前国内外关于纤维增强混凝土应用于 3D 打印技术的研究现状进行了综述，总结了各类可打印纤维增强混凝土材料、打印工作性能和力学性能，并讨论了 3D 打印纤维增强混凝土材料的发展机遇和正面临的挑战。

在力学性能方面，3D 打印纤维增强混凝土具有比普通混凝土更高的抗压和抗弯强度，其中可打印钢纤维混凝土的抗压强度和碳纤维混凝土的抗弯强度均超过了 100 MPa，可打印 PE-ECC 更是具有优异抗拉性能和裂缝控制能力，弥补了传统混凝土抗拉性能弱这一缺点。在结构形式方面，仿生结构、曲面异型结构以及拓扑结构等都是 3D 打印纤维增强混凝土未来的发展机遇。然而，纤维种类选择、打印后力学性能评价方法以及施工工艺和设备技术的统一标准仍是 3D 打印纤维增强混凝土当前亟需解决的难题。

总而言之，混凝土 3D 打印技术具有劳动力成本低、无模板施工、适用于各类施工场地等优点，是建筑行业的潜在发展方向之一，它与纤维增强混凝土材料的结合有望为未来的建筑行业开辟一片新的领域。

参考文献:

[1] 常西栋, 李维红, 王乾. 3D打印混凝土材料及性能测试研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(8): 2435–2441.
CHANG Xidong, LI Weihong, WANG Qian. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2019, 38(8): 2435–2441.

[2] 丁烈云, 徐捷, 覃亚伟. 建筑3D打印数字建造技术研究应用综述[J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32(3): 1–10.
DING Lieyun, XU Jie, QIN Yawei. J Civ Eng Manag(in Chinese), 2015, 32(3): 1–10.

[3] BUSWELL R A, LEAL D S W R, JONES S Z, et al. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research[J]. Cem Concr Res, 2018, 112: 37–49.

[4] 朱彬荣, 潘金龙, 周震鑫, 等. 3D打印技术应用于大尺度建筑的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(23): 4150–4159.
ZHU Binrong, PAN Jinlong, ZHOU Zhenxin, et al. Mater Rep(in Chinese), 2018, 32(23): 4150–4159.

[5] 张大旺, 王栋民. 3D打印混凝土材料及混凝土建筑技术进展[J]. 硅酸盐学报, 2015, 34(6): 1583–1588.
ZHANG Dawang, WANG Dongmin. J Chin Ceram Soc(in Chinese), 2015, 34(6): 1583–1588.

[6] NGO T D, KASHANI A, IMBALZANO G, et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges[J]. Compos Part B: Eng, 2018, 143: 172–196.

[7] MARCHMENT T, SANJAYAN J. Mesh reinforcing method for 3D Concrete Printing[J]. Autom Constr, 2020, 109: 102992.

[8] LI Z J, WANG L, MA G W. Mechanical improvement of continuous steel microcable reinforced geopolymer composites for 3D printing subjected to different loading conditions[J]. Compos Part B: Eng, 2020, 187: 107796.

[9] MECHTCHERINE V, GRAFE J, NERELLA V N, et al. 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction – Manufacture, mechanical properties and bond behaviour[J]. Constr Build Mater, 2018, 179: 125–137.

[10] 解燕春. 纤维增强混凝土力学性能及耐久性研究进展[J]. 科技风, 2021, (3): 108–109+145.
JIE Yanchun. Technol Wind(in Chinese), 2021, (3): 108–109+145.

[11] HAMBACH M, MOELLER H, NEUMANN T, et al. Portland cement paste with aligned carbon fibers exhibiting exceptionally high flexural strength (>100 MPa)[J]. Cem Concr Res, 2016, 89: 80–86.

[12] PANDA B, PAUL S C, TAN M J. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material[J]. Mater Lett, 2017, 209: 146–149.

[13] MA G W, LI Z J, WANG L, et al. Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing[J]. Constr Build Mater, 2019, 202: 770–783.

[14] DING T, XIAO J Z, ZOU S, et al. Anisotropic behavior in bending of 3D printed concrete reinforced with fibers[J]. Compos Struct, 2020, 254: 112808.

[15] NEMATOLLAHI B, VIJAY P, SANJAYAN J, et al. Effect of polypropylene fibre addition on properties of geopolymers made by 3D printing for digital construction[J]. Materials, 2018, 11(12): 2353.

[16] LI V C. Engineered Cementitious Composites (ECC)[M]. Springer, 2019.

[17] DANIEL G, SOLTAN A, LI V C. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing[J]. Cem Concr Comp, 2018, 90: 1–13.

[18] BAO Y, XU M, SOLTAN D, et al. Three-dimensional printing multifunctional engineered cementitious composites (ECC) for structural elements[C]//1st RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication (Digital Concrete), Zurich, Switzerland, 2019, 19: 115–128.

[19] YU J, LEUNG C K Y. Impact of 3D printing direction on mechanical performance of strain-hardening cementitious composite (SHCC)[C]// 1st RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication (Digital Concrete), Zurich, Switzerland, 2019, 19: 255–265.

[20] FIGUEIREDO S C, RODRIGUEZ C R, AHMED Z Y, et al. Materials and design—An approach to develop printable strain hardening cementitious composites[J]. Mater Design, 2019, 165: 107651.

[21] FIGUEIREDO S C, RODRIGUEZ C R, AHMED Z Y, et al. Mechanical behavior of printed strain hardening cementitious composites[J]. Materials, 2020, 13(10): 2253.

[22] OGURA H, NERELLA V, MECHTCHERINE V. Developing and testing of strain-hardening cement-based composites (SHCC) in the context of 3D-printing[J]. Materials, 2018, 11(8): 1375.

[23] ZHU B R, PAN J L, NEMATOLLAHI B, et al. Development of 3D printable engineered cementitious composites with ultra-high tensile ductility for digital construction[J]. Mater Design, 2019, 181: 108088.

[24] YE J H, CUI C, YU J T. Fresh and anisotropic-mechanical properties of 3D printable ultra-high ductile concrete with crumb rubber[J]. Compos Part B: Eng, 2021, 211: 108639.

[25] YE J H, CUI C, YU J T. Effect of polyethylene fiber content on workability and mechanical-anisotropic properties of 3D printed ultra-high ductile concrete[J]. Constr Build Mater, 2021, 281: 122586.

[26] ARUNOTHAYAN A R, NEMATOLLAHI B, RANADE R, et al. Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction[J]. Constr Build Mater, 2020, 257: 119546.

[27] ARUNOTHAYAN A R, NEMATOLLAHI B, RANADE R, et al. Fiber orientation effects on ultra-high performance concrete formed by 3D printing[J]. Cem Concr Res, 2020, 143: 106384.

[28] PHAM L, TRAN J P, SANJAYAN J. Steel fibres reinforced 3D printed concrete: Influence of fibre sizes on mechanical performance[J]. Constr Build Mater, 2020, 250: 118785.

[29] WANGLER T P, ROUSSEL N, BOS F P, et al. Digital concrete: a review[J]. Cem Concr Res, 2019, 123: 105780.

[30] HOU S D, DUAN Z H, XIAO J Z, et al. A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design[J]. Constr Build Mater, 2021, 273: 121745.

[31] YU K Q, MCGEE W, LI V C, et al. 3D-printable engineered cementitious composites (3DP-ECC): Fresh and hardened properties[J]. Cem Concr Res, 2021, 143: 106388.

[32] BOS F P, BOSCO E, SALET T. Ductility of 3D printed concrete reinforced with short straight steel fibers[J]. Virtual Phys Prototy, 2018, 14(2): 160–174.

[33] HAMBACH M, VOLKMER D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste[J]. Cem Concr Comp, 2017, 79: 62–70.

[34] WIJFFELS M, WOLFS R, SUIKER A, et al. Magnetic orientation of steel fibres in self-compacting concrete beams effect on failure behavior[J]. Cem Concr Comp, 2017, 80: 342–355.

[35] SHAKOR P, NEJADI S, SUTJIPTO S, et al. Effects of deposition velocity in the presence/absence of E6-glass fibre on extrusion-based 3D printed mortar[J]. Addit Manuf, 2020, 32: 101069.

[36] CHEN M X, YANG L, ZHENG Y, et al. Rheological behaviors and structure build-up of 3D printed polypropylene and polyvinyl alcohol fiber reinforced calcium sulphoaluminate cement composites[J]. J Mater Res Technol, 2021, 10: 1402–1414.

[37] LI V C, BOS F P, YU K Q, et al. On the emergence of 3D printable engineered, strain hardening cementitious composites (ECC/SHCC)[J]. Cem Concr Res, 2020, 132: 106038.

[38] SUN X Y, WANG Q, WANG H L, et al. Influence of multi-walled nanotubes on the fresh and hardened properties of a 3D printing PVA mortar ink[J]. Constr Build Mater, 2020, 247: 118590.

[39] MOELICH G M, KRUGER J, COMBRINCK R. Plastic shrinkage cracking in 3D printed concrete[J]. Compos Part B: Eng, 2020, 200: 108313.

[40] KRUGER J, CHO S, ZERANKA S, et al. 3D concrete printer parameter optimisation for high rate digital construction avoiding plastic collapse[J]. Compos Part B: Eng, 2020, 183: 107660.

[41] 杜修力, 金浏, 李冬. 混凝土与混凝土结构尺寸效应述评(I):材料层次[J]. 土木工程学报, 2017, 50(9): 28–45.
DU Xiuli, JIN Liu, LI Dong. Chin Civ Eng J (in Chinese), 2017, 50(9): 28–45.

[42] YE J H, YU J T, CUI C, et al. Flexural size effect of ultra-high ductile concrete under different damage and ductility levels[J]. Cem Concr

Comp, 2021, 115: 103852.

[43] SANJAYAN J, NEMATOLLAHI B, XIA M, et al. Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 172: 468–475.

[44] ZAREIYANA B, KHOSHNEVIS B. Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete[J]. Autom Constr, 2017, 83: 212–221.

[45] MARCHMENT T, SANJAYAN J. Bond properties of reinforcing bar penetrations in 3D concrete printing[J]. Autom Constr, 2020, 120: 103394.

[46] 刘致远, 王振地, 王玲, 等. 3D打印水泥净浆层间拉伸强度及层间剪切强度[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(5): 648–652.
LIU Zhiyuan, WANG Zhendi, WANG Ling, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(5): 648–652.

[47] Le T T, AUSTIN S A, LIM S, et al. Hardened properties of high-performance printing concrete[J]. Cem Concr Res, 2012, 42(3): 558–566.

[48] PLESSIS A D, BABAFEMI A J, PAUL S C, et al. Biomimicry for 3D concrete printing: A review and perspective[J]. Addit Manuf, 2021, 38: 101823.

[49] SOLTAN D G, LI V C. Nacre-inspired composite design approaches for large-scale[J]. Cem Concr Comp, 2018, 88: 172–186.

[50] YE J H, YU K Q, YU J T, et al. Designing ductile, tough, nacre-inspired concrete member in metric scale[J]. Cem Concr Comp, 2021, 118: 103987.

[51] WEGST U G K, BAI H, SAIZ E, et al. Bioinspired structural materials[J]. Nat Mater, 2015, 14: 23–36.

[52] CARNEAU P, MESNIL R, ROUSSEL N, et al. Additive manufacturing of cantilever - From masonry to concrete 3D printing[J]. Autom Constr, 2020, 116: 103184.

[53] COSTANZI C B, AHMED Z Y, SCHIPPER H R, et al. 3D printing concrete on temporary surfaces: The design and fabrication of a concrete shell structure[J]. Autom Constr, 2018, 94: 395–404.

[54] LIM S, BUSWELL R A, VALENTINE P J, et al. Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components[J]. Addit Manuf, 2016, 12: 216–230.

[55] WANG L, JIANG H L, LI Z J, et al. Mechanical behaviors of 3D printed lightweight concrete structure with hollow section[J]. Arch Civ Mech Eng, 2020, 20:16.

[56] AMIR O, SHAKOUR E. Simultaneous shape and topology optimization of prestressed concrete beams[J]. Struct Multidiscip Optim, 2018, 57: 1831–1843.

[57] ASPRONE D, AURICCHIO F, MENNA C, et al. 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach[J]. Constr Build Mater, 2018, 165: 218–231.

[58] VANTYGHEM G, CORTE W D, SHAKOUR E, et al. 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization[J]. Autom Constr, 2020, 112: 103084.