第 49 卷第 5 期
2021 年 5 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 5
May，2021

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

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200736

综 合 评 述

3D 打印混凝土材料与结构增强技术研究进展

孙晓燕，叶柏兴，王海龙，陈 龙

(浙江大学建筑工程学院，杭州 310058)

摘 要：混凝土 3D 打印技术是当前土建领域的研究热点之一。由于混凝土材料破坏具有明显的脆性，因此对 3D 打印混凝土材料与结构的增强增韧技术需要得到重视。按照打印与增强的时间顺序总结和分析现有 3D 打印混凝土材料与结构增强与增韧方法，对比各种增强技术的优势与不足，并针对混凝土 3D 打印技术研究和推广应用需要解决的技术难题进行了总结与展望。

关键词：三维(3D)打印；混凝土；增强方式；力学性能
中图分类号：TQ175　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)05–0878–09
网络出版时间：2021–04–12



Recent Development on Reinforcing Technology of 3D Printing Concrete Materials and Structure

SUN Xiaoyan, *YE Boxing*, *WANG Hailong*, *CHEN Long*
(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Concrete 3D printing technology is one of the current research hotspots in the field of civil engineering. The strengthening and toughening technologies for 3D printing concrete materials and structure are particularly important since the failure of concrete is brittle. According to the sequence of printing and reinforcing, the advantages and disadvantages of existing strengthening and toughening methods for 3D printing concrete materials and structure were reviewed. In addition, some technical and scientific problems for the further study and application of 3D printing concrete were also prospected.

Keywords: three dimensional (3D) printing; concrete; reinforcing method; mechanical property

混凝土 3D 打印是一种能够实现空间自由设计、制造复杂几何造型的新兴智能建造技术[1–3]。该技术不仅可提高建筑材料利用率、缩短建造周期、减少碳排放量和劳动力成本，还可显著提升设计的数字化智能化水平和建造施工的装配化精细化程度[4–6]。与传统施工方式相比，混凝土 3D 打印技术可减少 30%~60%的建筑垃圾，50%~80%的人工成本和 50%~70%的生产时间[7]。

3D 打印混凝土为了适应泵送挤出、轮廓成型工艺，具备打印所需的流动性和触变性而取消了粗骨料。泵送挤出、逐层打印、堆积成型的技术特点使得 3D 打印混凝土深受打印流程、挤出形状和打印路径等影响，其力学性能呈现空间各向异性，与传统混凝土材料迥异，被视为一种新型智能建造材料。现阶段 3D 打印混凝土材料可满足工作性能的技术要求，但其抗拉强度低和脆性破坏的材料缺陷阻碍了其在建筑工程中的应用和发展。而且无筋空间建造也难以满足现代工业和民用建筑的服役和使用要求[8–10]。由于传统结构增强方式难以与 3D 打印工艺相融合，探求与混凝土 3D 打印相协调的增强方式尤为重要。

收稿日期：2020–09–30。　修订日期：2020–10–18。
基金项目：国家自然科学基金项目(52079123)；浙江省重点研发计划项目(2021C01022)。
第一作者：孙晓燕(1976—)，女，博士，副教授。
通信作者：王海龙(1974—)，男，博士，教授。

Received date: 2020–09–30.　**Revised date:** 2020–10–18.
First author: SUN Xiaoyan (1976–), female, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: selina@zju.edu.cn
Correspondent author: Wang Hailong (1974–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: hlwang@zju.edu.cn

近年来，国内外正在探寻可与 3D 打印混凝土工艺兼容以形成一体化建造的结构增强技术。目前，3D 打印混凝土结构主要以高强度高模量的短细纤维[11–18]和连续筋、线、绳材[19–34]等增强材料进行增强，按打印过程与增强工序的先后顺序可分为：打印前增强；打印后增强；打印时增强。打印前增强主要通过掺入纤维改善3D打印材料整体性能[11–18]，快速有效改善打印混凝土性能，但受限于对混凝土可打印性的要求，纤维掺量应不超过某一范围，限制了其工程使用范围。打印后增强是将混凝土构件打印完成后再通过增强材料进行局部增强与增韧[19–27]，可与传统建造方式，尤其是后张法预应力技术兼容，可省却模板施工的繁杂工序，显著提高打印混凝土的承载能力与变形能力，但与其他增强方式相比，具有耗时多，工序繁的特点。打印时增强是在挤压混凝土堆叠成型的过程中布设钢缆[28–32]、钢丝网[33]、钢骨料纤维网格[35]等增强材料的结构一体化智能建造技术。由于打印工艺限制，该技术对打印设备与打印材料的要求较高。为了给 3D 打印增强混凝土结构工程化应用化提供技术参考与理论借鉴，本文按增强技术类型分别从打印前增强、打印后增强和打印时增强 3 个方面讨论和分析了 3D 打印混凝土增强技术的研究进展，并进行总结与展望。

1　打印前增强

1.1　柔性短切纤维增强增韧

掺入短切纤维是一种最为便捷的打印混凝土增强增韧方式。柔性短切纤维在混凝土材料的挤出过程中会形成纤维定向效应，导致指定方向上增强效果显著[12, 36–37]，但过多纤维掺入会影响打印流程[12–14]，降低混凝土的工作性能。目前，打印混凝土的纤维掺量一般小于 2%[11–18]。适宜的纤维掺量不仅使得打印材料具有良好的工作性能和力学性能，还能减少甚至消除打印混凝土层条间缺陷的不利影响，根据文献[14]的研究，即使在抗折强度最弱的 *E*1 方向(如图 1)，纤维增强打印混凝土试件的破坏不再由层条间缺陷主导。

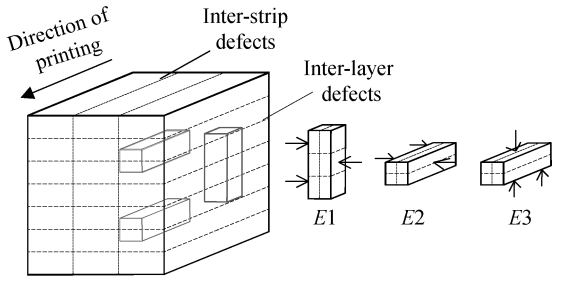


图 1　试件的加载方向

Fig. 1　Loading direction of specimens

打印混凝土的增强增韧效果与纤维性能参数密切相关。由于纤维定向效应与打印混凝土层条缺陷的空间分布，纤维增强打印混凝土抗折性能也具有明显的空间各向异性(如图 1 所示)。其在 *E*3 方向的抗折强度分别是 *E*1 和 *E*2 方向的 118.2%~238.6%和 88.3%~115.9%[11, 13, 16]。现有研究探讨了玻璃纤维[11–12](GF)、碳纤维[12](CF)、玄武岩纤维[12–13, 38](BF)、聚乙烯纤维[14](PEF)、高密度聚乙烯纤维[37](HDPEF)、聚乙烯醇纤维[36](PVAF)和聚丙烯纤维[15](PPF)等对打印混凝土的影响，其性能参数如表 1 所示。对比 *E*3 方向加载时不同纤维掺量打印混凝土与纤维掺量为 0.25%的打印混凝土的相对抗折强度(如图 2a 所示)，发现相对抗折强度差异较大，取值为 0.72~3.47。随着纤维掺量的增加，8 mm 玻璃纤维增强混凝土获得更低的抗折强度，造成这种现象的主要原因是掺入纤维在搅拌中缠绕和团聚导致打印成型的混凝土孔隙率增大，降低打印混凝土力学性能；当纤维弹性模量较小时，分布在混凝土中纤维的

表 1　不同种类纤维的参数

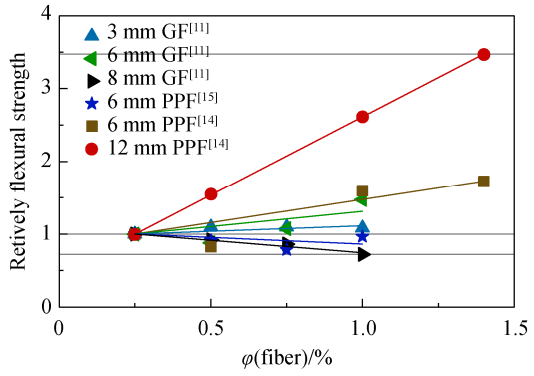
Table 1　The parameters of different types of fibers

Fiber type	Length/mm	Aspect ratio	Young's modulus /GPa	Tensile strength /MPa	Reference
GF	3	300	72	3500	Hambach M.[12]
CF	6	428.6	230	3950	Hambach M.[12]
BF	6	461.5	93	4200	Hambach M.[12]
PEF	6(12)	300(600)	100	2400	Ding T.[14]
HDPEF	6	500		3000	Ogura H.[37]
PVAF	12				Daniel G.S.[36]
PPF	6	535.7	13.2	880	Nematollahi B.[15]

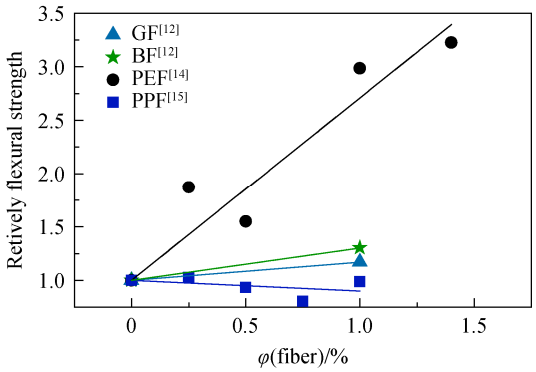
GF is glass fiber; CF is carbon fiber; BF is basalt fiber; PEF is polyethylene fiber; HDPEF is high density polyethylene fiber; PVAF is polyvinyl alcohol fiber; PPF is polypropylene fiber.

桥接能力不足以抵消孔隙率增大对抗折强度的不利影响时，打印混凝土的抗折强度随纤维含量的增加而降低[15]。图 2b 对比了长度均为 6 mm 时不同纤维增强打印混凝土与未增强打印混凝土的相对抗折强度，发现抗折强度提升率受纤维种类影响显著，取值为 0.80~3.23，长度均为 6 mm 时不同种类纤维对打印混凝土抗折强度增强效果从高到低排序为 PEF，BF，GF，PPF，纤维弹性模量是影响增强效率的显著参数。

柔性短切纤维的掺入还显著提升了打印混凝土的抗拉性能。目前对纤维增强打印混凝土试件在沿打印方向上的轴拉性能研究结果如表 2 所示。3 mm GF 掺量为 1.0%(体积分数，下同)时打印混凝土试件的抗拉强度比纤维含量为 0.25%时试件的抗拉强度提高了 93.6%；6 mm HDPEF 对打印混凝土抗拉强度的增强效果与 12 mm PEF 相近，但后者对打印混凝土的延性增强效果更好；长度均为 12 mm 且掺量均为 2.0%时，PEF 增强混凝土的极限应变约是 PVAF 增强效果的 3.9 倍。12 mm PEF 的极限应变的增长率(纤维掺量与极限应变之间拟合直线的斜率)为 7.86，而 6 mm HDPEF 的极限应变增长率仅为 4.66，这是由于较大的长度使 PEF 在打印混凝土中抗拔出能力优于 HDPEF。



(a) Different type of fiber



(b) Fibers at a length of 6 mm

φ is volume fraction.

图 2 不同纤维增强打印混凝土相对抗折强度[11–12, 14–15]

Fig. 2 Relatively flexural properties of printed concrete with different fibers[11–12, 14–15]

表 2 打印混凝土的轴拉强度

Table 2 Ultimate tensile strength of printed concrete

Reference	Reinforcement	Volume fraction of fiber/%	Ultimate tensile strength/MPa	Ultimate tensile strain capacity/%
Ogura H[37]	6 mm HDPEF	1.00	5.32	0.88
		1.50	5.66	3.21
Panda B[11]	3 mm GF	0.25	0.78	
		0.50	0.89	
		0.75	1.25	
		1.00	1.51	
Zhu B R[39]	12 mm PEF	1.00	5.61	3.57
		1.50	5.68	9.57
		2.00	5.35	11.43
Daniel G S[36]	12 mm PVAF	2.00	4.20	2.90

1.2 刚性短切纤维增强增韧

刚性短切纤维的种类主要是钢纤维(SF)，由于打印工艺限制，目前研究均选用平直形钢纤维。Pham 等[16]对比了钢纤维长度(3 mm 和 6 mm)与掺量(0~1%)对打印混凝土力学性能的影响，发现钢纤维增强 3D 打印混凝土的抗压强度可提高 17%~26%，抗折强度可提高 14%~16%；钢纤维在打印混凝土中也存在纤维定向效应，钢纤维的长度、数量及其定向效应对打印混凝土指定方向抗折强度的提升至关重要，掺量过少或者长度过短的钢纤维对打印混凝土性能提升均不明显。Arunothayan 等[17]发现，与未掺入钢纤维的混凝土基体相比，13 mm 钢纤维掺量为 2%时 3D 打印混凝土的抗压强度提升了 16%~26%，层间黏结强度增大了 88.9%，抗折强度提高了 145%~242%，弯曲韧性提升了 3 550%~7 250%。

图 3 归纳了刚性与柔性短切纤维对打印混凝土抗折强度的影响。结果表明：相对于柔性短切纤维，刚性短切纤维对打印混凝土抗折强度增强效果不具有明显的优势。这是由于打印混凝土中纤维的桥接能力与纤维的弹性模量密切相关[15]。图 4 对比不同材料的增强效果(图 3 中不同纤维线性拟合的斜率)与材料弹性模量的关系，除去偏差较大的 PEF，纤维的增强效果与弹性模量呈现出近似线性相关的趋势。掺入纤维的缠绕和团聚导致混凝土孔隙率增大，降低打印混凝土的抗折强度，但其在受拉方向上的桥接作用能有效传递荷载和抑制裂缝扩展，高弹模纤维可提供更强的桥接作用。由图 4 可知：纤维产生的桥接作用正好抵消纤维引入孔隙率增大产生的损失时纤维的弹性模量为 43.6 GPa。有鉴于此，可偏于安全地将 50.0 GPa 作为打印混凝土中增强纤维弹性模量的选材标准。

2　打印后增强

2.1　内置钢筋笼增强

现阶段普遍采用的打印混凝土内置钢筋增强结构的施工技术为：打印混凝土外模，在模板内放置增强钢筋笼，与现浇混凝土形成叠合结构。该增强技术兼具 3D 打印与现有施工技术的优点，可节省模板和人工费用，具有重要的工程应用意义。

高君峰[19]和葛杰等[20]对打印混凝土叠合柱性能的研究如表 3 所示。结果表明：由于打印外壳的围箍效应，同等荷载作用下，叠合柱的应变略低于整体现浇柱[19]；叠合柱的破坏主要是 3D 打印外壳压坏、脱落[20]，均为脆性破坏；截面是方形的叠合柱与现浇柱的极限承载能力之比范围在 81.4%~123.1%。轴心受压叠合柱的承载力提高，而偏心受压叠合柱的承载力降低，这是由于打印混凝土外模存在层条缺陷，轴向压力作用下层间缺陷对受压承载力降低不明显，而外壳围箍效应对核心混凝土的受力变形性能均有明显提升；而当叠合柱承受偏心压力作用时，经受拉应力一侧的层间缺陷形成薄弱失效界面，导致叠合柱的承载力降低。

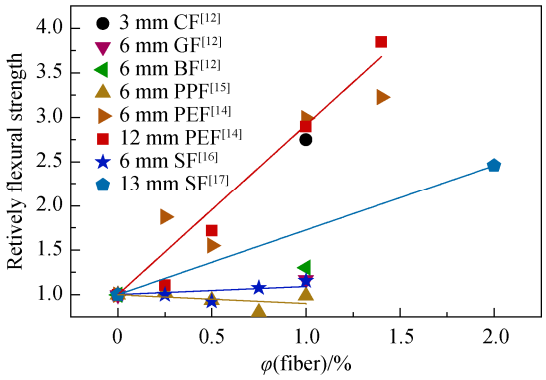


图 3　纤维增强打印混凝土的相对抗压强度[12,14–17]

Fig. 3　Relatively flexural properties of fiber reinforced printed concrete[12,14–17]

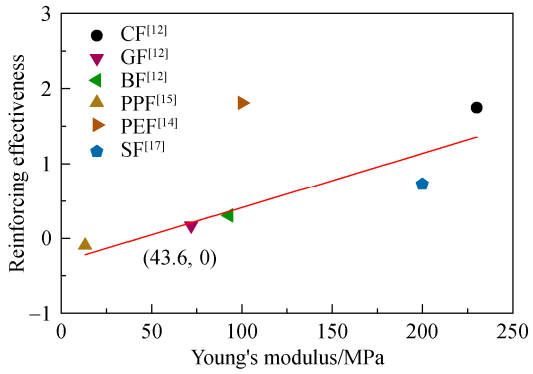


图 4　纤维弹性模量与增强效果的关系[12,14–15,17]

Fig. 4　Relationship of Young's modulus and reinforcing effectiveness[12,14–15,17]

表 3　打印现浇组合叠合柱受压性能

Table 3　Compressive properties of printed superposed column

Reference	Section size (mm×mm×mm)	Longitudinal reinforcing ratio/%	Eccentricity/mm	Reinforcing effectiveness (Compare to cast concrete)
[19]	200×200×600	1.54	0	The cracking load and ultimate compressive strength are enhanced by 158.2% and 23.1%, respectively.
[19]	Φ190×700	2.39	0	The cracking load and ultimate compressive strength are enhanced by 144.3% and 36.0%, respectively.
[20]	400×400×3600	0.35	50 (small)	The ultimate compressive strength is decreased by 18.6%.
[20]	400×400×3600	0.35	150 (large)	The ultimate compressive strength is decreased by 1.8%.
[20]	400×400×3600	0.35	200 (large)	The ultimate compressive strength is decreased by 14.4%.

此外，一些学者已开始探究叠合梁和叠合墙的性能。如，高君峰[19]对比叠合梁与现浇梁的抗弯性能和抗剪性能。结果表明：叠合梁受弯时，内部钢筋的应变高于现浇梁，裂缝间距减小，开裂荷载提

高了 76.9%，承载力下降 5.8%左右；叠合梁受剪时，无腹筋打印叠合梁的破坏模式是剪压破坏，抗剪强度比现浇梁提高了 18.2%；有腹筋打印叠合梁的破坏模式是斜压破坏，抗剪强度比现浇梁提高了 14.0%。葛杰等[21]对比 3D 打印配筋叠合墙和普通砌块配筋砌体墙的性能，发现 3D 打印叠合墙受压时出现多条较长的竖向裂缝，相比于普通砌砖墙，3D 打印叠合墙的承载力提高了 100%，墙体的横向和斜向裂缝较少，最终表现为脆性破坏。

3D 打印与传统现浇工艺相结合的方法可节省制造模板的工期与费用，并延续了现代钢筋混凝土的设计、施工技术框架，但是打印工艺引起层条缺陷在空间各向分布导致叠合结构的设计方法和破坏模式均需进一步研究。

2.2 预应力增强

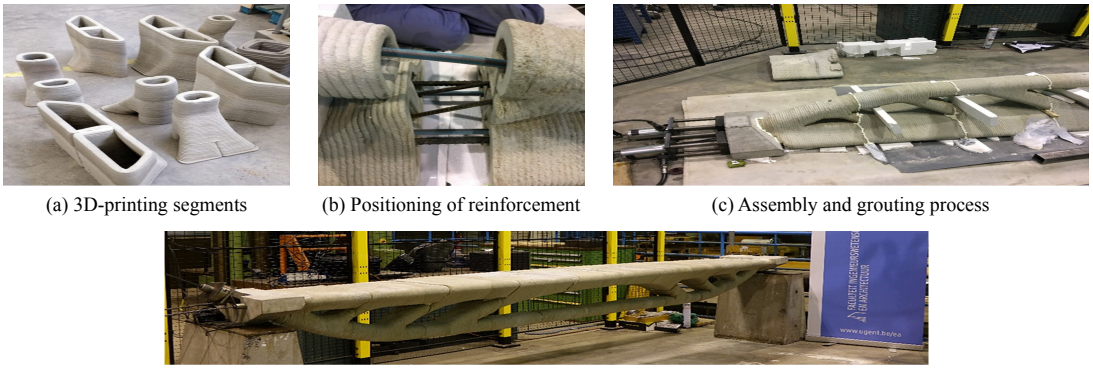
现有 3D 打印混凝土的预应力增强通常采用后张法，可分为打印混凝土构件、布置预应力筋与普通钢筋、张拉锚固与灌浆形成整体 3 个步骤(如图 5)。受混凝土打印设备尺寸限制，现阶段在混凝土构件打印施工时一般采用分块打印，然后通过结构装配和预应力方法增强结构性能。相比于常规标准化拼装试件，该施工能提高空间复杂多变结构的施工效率。Salet 等[23]基于该方法建成了 3D 打印自行车桥，通过试验研究证明建造成型的桥梁可满足结构使用要求。拓扑优化技术、3D 打印和后张法预应力技术三者结合是可行的，Vantyghem 等[24]采用这些技术制造预应力箱梁桥，试验研究了梁体的承载力和变形，结果表明：与相同宽度和高度的 T 型梁截面相比，就自重和活载下的中跨挠度而言，打印拼装梁大约可节省 20%的材料。

2.3 其他增强方式

混凝土打印完成后，在硬化前植入钢钉增强是一种可行的增强方法。Perrot 等[25]采用从打印混凝土的上方以不同角度向下植入钢钉以增强打印混凝土的抗折强度，发现以 45°倾角斜向搭接着植入打印混凝土时抗折增强效果最好，比未增强的打印混凝土提高了 37%；表面粗糙程度越高的钢钉对界面的增强效果越好。但该方法除了需要考虑施工工艺的机械化实现难度，还需考虑钢钉与混凝土随时间变化对成型结构的性能影响。

通过体外粘贴纤维复合材料(FRP)也是改善打印结构承载力和变形性能的有效途径，孟鑫淼[26]通过对环向外包玻璃纤维复合材料(GFRP)的打印圆柱和底部粘贴 GFRP 的打印梁进行了力学性能研究，发现与未增强打印混凝土相比，GFRP 增强打印柱的峰值荷载提高 1 427.2%~1 792.0%，极限变形能力提高 833.9%~1 171.3%；GFRP 增强打印梁的破坏模式均为脆性破坏，但是通过底部粘贴 GFRP 和环向约束的方式可以延缓破坏时的脆性，与未增强的混凝土梁相比，GFRP 增强打印梁的抗弯承载力提高 179.6%~604.5%，峰值荷载对应的跨中挠度增大 40.8%~225.8%。

体外的钢筋系统可提高打印拼装梁体的刚度和承载能力，Asprone 等[27]利用 3D 打印实现空间造型的优势和形状拓扑优化，经过 3D 打印构件并装配梁体与外加钢筋系统浇筑连接，再通过试验和模拟分析桁架直梁的弯曲行为和破坏机理，发现 3D 打印梁的受力变形分为线弹性和非线性 2 个阶段：线性阶段时 3D 打印桁架梁的初始抗弯刚度与等效的实心钢筋混凝土梁相同，但可减小自重；非线性阶段主要由钢筋连接系统的有效性随着荷载的增加而降低造成的，打印梁节段可能会因剪力而产生局部破坏。



(a) 3D-printing segments (b) Positioning of reinforcement (c) Assembly and grouting process

(d) 3D printing of a post-tensioned concrete girder

图 5 预应力后张法增强打印混凝土制备方法[24]

Fig. 5 Manufacture of post-tensioned printed concrete[24]

3　打印时增强

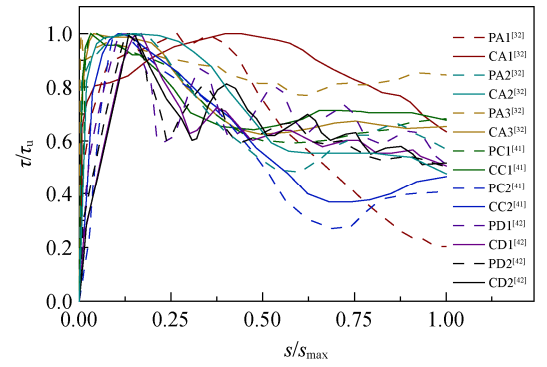
钢材是建筑领域中常见的增强材料[40]，它与混凝土之间良好的粘结性能是保证增强结构服役性能的关键。表 4 归纳了现有建筑增强材料与 3D 打印混凝土的粘结性能。这些研究表明：平均粘结应力与增强材料的埋入长度关系不大[31−32]；打印混凝土的层条挤出堆叠工艺造成层条缺陷，模板浇筑通过振捣工艺提升了混凝土的密实度，从而导致后者对增强材料的握裹更加密实。打印混凝土与增强材料之间粘结应力和现浇混凝土与增强材料与之间粘结应力之比(相对粘结强度)为 0.27~0.96。打印混凝土与增强材料之间的粘结强度随着打印路径与筋材布置夹角的改变而不同，增强材料与打印混凝土条间缺陷相交后，条间缺陷对粘结区域的影响随着角度的增加而呈现增加趋势[41−42]。对于同一打印混凝土基体材料，角度对粘结强度呈明显的负相关。直径对增强材料与打印混凝土之间的粘结强度影响显著[42−43]，增强材料直径与相对粘结强度呈正向相关趋势。这是由于随着直径的增大，增强材料占据混凝土层条缺陷体积的比重随之增加，减小了打印混凝土与现浇混凝土之间的差异。对照打印混凝土与增强材料(序列号前加 P)和现浇混凝土与增强材料(序列号前加 C)的归一化粘结滑移曲线，如图 6a，可以发现：二者演化规律大致相同，当位移达到最大时，粘结残余强度一般为极限粘结强度的 0.41~0.67；对比峰值后(相对滑移大于 0.2)相同滑移下增强材料与现浇混凝土和打印混凝土的归一化粘结滑移曲线的差值，如图 6b 所示，可按增强材料与打印混凝土的残余粘结性能将增强材料直径分为 3 类：当 $d \leqslant 1$ mm 时，打印混凝土与现浇混凝土的残余粘结性能的差异在 30%~60%；当 1 mm<d<8 mm 时，打印混凝土与现浇混凝土的残余粘结性能的差异在 15%~30%；当 $d \geqslant 8$ mm 时，打印混凝土与现浇混凝土的残余粘结性能的差异在 15%以内。为减小打印混凝土与现浇混凝土之间残余粘结性能的差异，建议采用直径大于 8 mm 的增强材料。

表 4　打印混凝土与增强材料的粘结试验

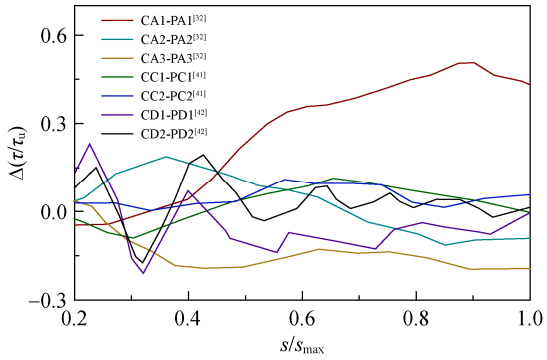
Table 4　Pull-out test between printed concrete and reinforcement

Reference	Reinforcement				φ/%	θ/(°)	τ_u/MPa	τ_u/τ_c
	Series	Diameter	Young's modulus/GPa	Tensile strength/MPa				
Bos F P [32]	A1	Φ0.63 mm steel cable	420	181.6	0	0	2.37–3.10	0.49
	A2	Φ0.97 mm steel cable	1 190	178.3	0	0	1.33–1.42	0.27
	A3	Φ1.20 mm steel cable	1 925	156.8	0	0	1.29–2.19	0.39
Li Z J[31]	B1	Φ1.20 mm steel cable	860	192	0	0	4.03–4.79	
Gao C[41]	C1	Φ10 mm adhering sand BFRP rebar	750	40	1.2	0	23.62	0.85
					1.2	45	22.98	0.83
					1.2	90	20.18	0.73
	C2	Φ10 mm smooth BFRP rebar	750	40	1.2	0	21.85	0.88
					1.2	45	19.16	0.77
					1.2	90	17.09	0.69
Chen J[42]	D1	Φ6 mm steel cable rope	1570		1.2	0	16.05	0.76
					1.2	45	14.91	0.71
					1.2	90	10.42	0.49
	D2	Φ8 mm steel cable rope	1570		1.2	0	14.37	0.73
					1.2	45	12.06	0.61
					1.2	90	9.05	0.46
Wu L[43]	E1	Φ12 mm steel rebar			0.15	0	7.2	0.96
	E2				0.35	45	7.64	0.63
	E3				0.25	90	5.94	0.64
	E4	Φ14 mm steel rebar			0.25	0	5.18	0.66
	E5				0.15	45	4.22	0.63
	E6				0.35	90	5.14	0.49
	E7	Φ16 mm steel rebar			0.35	0	5.15	0.58
	E8				0.25	45	4.84	0.73
	E9				0.15	90	3.77	0.68

Note: φ is volume fraction of fiber; τ_u is the ultimate bond strength between reinforcement and printed concrete; τ_c is the ultimate bond strength between reinforcement and cast concrete, θ is the angle between the direction of printing and the longitudinal direction of reinforcement.



(a) Load-slip curve of pull-out test



(b) Relative load-slip curve of pull-out test at residual stage

图 6 混凝土与增强材料的粘结滑移曲线[32,41–42]

Fig. 6 Load-slip curves of pull-out test between reinforcement and concrete[32,41–42]

钢丝、钢缆与筋材相比具有一定的柔性，且与打印流程兼容性较好，易于通过打印喷嘴进行连续布设实现整体连续增强。不同学者对钢筋/丝增强打印混凝土结构抗弯性能的研究表明：在荷载的作用下钢丝网增强打印混凝土梁的裂缝从梁底竖直向上扩展与钢丝网相交时会出现沿着钢丝网方向延伸的横向裂缝[33]；通过不同打印路径制成的打印混凝土试件的抗弯承载力的增强效果差异较大，分别提高了 107%，405%和 443%[28]；未掺入短切纤维的打印混凝土内，连续钢缆在弯曲过程中易出现滑丝现象[32]，这是由于短切纤维的互锁与缠绕作用在一定程度上可阻止钢缆在打印混凝土中滑移[29, 32]；打印混凝土时在截面上均匀置入钢缆，其硬化后可视为协同变形的复合材料[28]。估算与归纳打印梁的配筋率和抗弯强度，结果表明：增强材料未滑移时，配筋率为 2%以内的打印混凝土梁抗弯强度能提高 107%~519%。图 7 分别归纳了夹带钢缆的均匀增强方式与在受拉区布筋的集中增强方式的配筋率及其对应的增强效果，发现随着配筋率的增大，二者之间的差异逐步增加，在受拉区布筋的增强方式效果更好。这两种增强方式得到抗弯性能实测增强效果线性拟合相关性均较好，其中 $R^2 \geqslant 0.925$，证明了未来的 3D 打印混凝土结构也可参考钢筋混凝土结构设计方法予以设计。

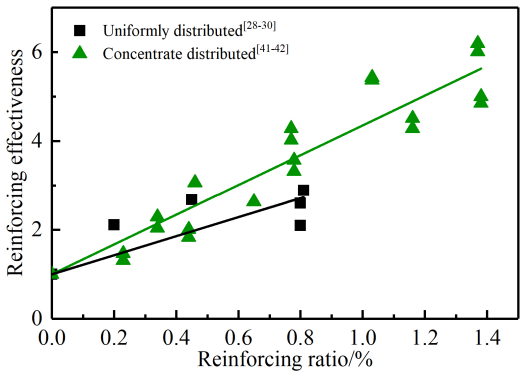


图 7 打印混凝土梁的抗弯增强效果[28–30, 41–42]

Fig. 7 Flexural reinforcing effectiveness of printed beams[28–30, 41–42]

4 结论与展望

从打印前增强、打印后增强和打印时增强整理分析了目前 3D 打印混凝土材料与结构增强技术的研究成果，得到如下结论：

1)纤维的刚度是影响打印混凝土抗折增强效率的关键参数，与抗折强度增强率近似线性相关，当纤维的弹性模量大于 50 GPa 时，纤维产生的桥接增强作用大于纤维引入孔隙率增大产生的损失，纤维增强打印混凝土的抗折强度随着纤维掺量的增加而增加。为了防止打印混凝土纤维过多而导致喷嘴堵塞，其纤维掺量一般不超过 2%。与弹性模量较大的柔性短切纤维相比，钢纤维对打印混凝土的增强效果并不具有明显的优势，而前者更易于适应混凝土的搅拌、挤出等工作性能的要求，更容易融入打印混凝土的建造工艺。

2)增强材料与打印混凝土的粘结滑移曲线和增强材料与现浇混凝土的粘结滑移曲线演化规律大致相同，当增强材料的直径大于 8 mm 时二者的归一化粘结滑移曲线差异在 15%以内。由于打印混凝土存在层条缺陷，且增强筋、线材往往布置在层间缺陷区域，增强材料与打印混凝土的粘结性强度为振捣均匀的现浇混凝土试件的 27%~96%。打印混凝土和增强材料之间的相对粘结强度与增强材料的直径呈正相关。

3)目前，打印时增强的方法还处于探索尝试阶段，打印梁的配筋率在 2%以内，其对应的抗弯强度可提高 107%~519%。根据截面布筋形式可将这些

打印梁的增强方式分为打印时夹带钢缆的均匀增强方式和在受拉区布筋的集中增强方式，其中在受拉区加固的增强方式效果更好。这两种增强方式得到抗弯性能实测增强效果线性拟合相关性均较好，其中 $R^2 \geqslant 0.925$，可参考钢筋混凝土结构抗弯构件设计方法，针对打印参数予以改进。

4)通过掺入纤维的方式对打印混凝土进行增强与增韧，可提高打印混凝土的力学性能，但纤维的非连续分布对结构整体受力和抗震性能不利；打印后增强结合了现有增强技术与 3D 打印工艺的特点，施工简单，但周期较长且增强后结构破坏模式和设计分析方法有待深入研究；打印混凝土同时布置筋、线、缆予以同步增强，可形成一体化建造的空间连续增强增韧，以满足结构的受力和变形要求，但由于增强材料布置在层条缺陷区域，结构的受力性能略有不足，且打印参数和打印工艺易导致成型结构性能呈空间各向异性，因而，亟待建立新的设计分析理论以保障安全服役。

参考文献:

[1] BORG COSTANZI C, 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.

[2] LIM J H, WENG Y, PHAM Q C. 3D printing of curved concrete surfaces using Adaptable Membrane Formwork[J]. Constr Build Mater, 2020, 232: 117075.

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

[4] WENG Y, LI M, RUAN S, et al. Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach[J]. J Cleaner Prod, 2020, 261: 121245.

[5] KREIGER E L, KREIGER M A, CASE M P. Development of the construction processes for reinforced additively constructed concrete[J]. Addit Manuf, 2019, 28: 39–49.

[6] LIM S, BUSWELL R A, LE T T, et al. Developments in construction-scale additive manufacturing processes[J]. Autom Constr, 2012, 21: 262–268.

[7] ZHANG J, WANG J, DONG S, et al. A review of the current progress and application of 3D printed concrete[J]. Compos Part A Appl Sci Manuf, 2019, 125: 105533.

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

[9] HAMIDI F, ASLANI F. Additive manufacturing of cementitious composites: Materials, methods, potentials, and challenges[J]. Constr Build Mater, 2019, 218: 582–609.

[10] ASPRONE D, MENNA C, BOS F P, et al. Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete[J]. Cem Concr Res, 2018, 112: 111–121.

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

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

[13] MA G, LI Z, 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, 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: 2352.

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

[17] 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.

[18] 金晓菁. 基于3D打印的磁定向钢纤维增强水泥基复合材料制备及梁的力学性能研究[D]. 北京工业大学, 2019.
JIN Xiaojing. Fabrication magnetically and mechanical properties of oriented steel fiber reinforced cement-based composites based on 3D printing(in Chinese, dissertation). Beijing: Beijing University of Technology, 2019.

[19] 高君峰. 3D打印永久性混凝土模板及其叠合构件试验研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2020.
GAO Junfeng. Mechanical properties of 3D printed concrete permanent formwork and integrated reinforced concrete components (in Chinese, dissertation). Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

[20] 葛杰, 白洁, 杨燕, 等. 3D打印结构柱偏压性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(3): 424–430.
GE Jie, BAI Jie, YANG Yan, et al. J Build Mater(in Chinese), 2019, 22(3): 424–430.

[21] 葛杰, 白洁, 杨燕, 等. 3D打印配筋砌体墙承载力试验研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 414–420.
GE Jie, BAI Jie, YANG Yan, et al. J Build Mater(in Chinese), 2020, 23(2): 414–420.

[22] KHOSHNEVIS B, HWANG D, YAO K T, et al. Mega-scale fabrication by contour crafting[J]. Int J Ind Syst Eng, 2006(1): 301.

[23] SALET T A M, AHMED Z Y, BOS F P, et al. Design of a 3D printed concrete bridge by testing[J]. Virtual Phys Prototy, 2018, 13: 222–236.

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

[25] PERROT A, JACQUET Y, RANGEARD D, et al. Nailing of layers: A promising way to reinforce concrete 3D printing structures[J]. Materials, 2020, 13: 1518.

[26] 孟鑫淼. 复合材料曲面夹芯板受力性能及应用技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
MENG Xinmiao. Mechanical behavior and application technology of FRP curved sandwich panels(in Chinese, dissertation). Beijing:

Tsinghua University, 2017.

[27] 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.

[28] MA G, LI Z, WANG L, et al. Micro-cable reinforced geopolymer composite for extrusion-based 3D printing[J]. Mater Lett, 2019, 235: 144–147.

[29] LIM J H, PANDA B, PHAM Q-C. Improving flexural characteristics of 3D printed geopolymer composites with in-process steel cable reinforcement[J]. Constr Build Mater, 2018, 178: 32–41.

[30] LI Z, WANG L, MA G, et al. Strength and ductility enhancement of 3D printing structure reinforced by embedding continuous micro-cables[J]. Constr Build Mater, 2020, 264: 120196.

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

[32] BOS F P, AHMED Z Y, JUTINOV E R, et al. Experimental exploration of metal cable as reinforcement in 3D printed concrete[J]. Materials, 2017, 10: 1314.

[33] MARCHMENT T, SANJAYAN J. Mesh reinforcing method for 3D concrete printing[J]. Autom Constr, 2020, 109: 102992.

[34] KHOSHNEVIS B. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies[J]. Autom Constr, 2004, 13: 5–19.

[35] SUN X Y, WANG H L, CHEN J, et al. Building method of 3D printing weaving integrated forming building(P). 2019.01.18, China, CN201811038630.2.

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

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

[38] LI L G, ZENG K L, OUYANG Y, et al. Basalt fibre-reinforced mortar: Rheology modelling based on water film thickness and fibre content[J]. Constr Build Mater, 2019, 229: 116857.

[39] ZHU B, PAN J, 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.

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

[41] 高超. BFRP筋增强3D打印混凝土梁式构件力学性能研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2020.
GAO Chao. Research on mechanical properties of 3D printed concrete beam members strengthened by BFRP bars(in Chinese, dissertation). Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

[42] 陈杰. 钢丝绳增强3D打印混凝土梁受力性能实验研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2020.
CHEN Jie. Experimental study on mechanical properties of 3D printed concrete beams reinforced with steel wire ropes(in Chinese, dissertation). Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

[43] 武雷, 杨威, 孙远, 等. 打印混凝土与钢筋的粘结性能试验研究[J]. 工业建筑, 2020: 1–10. https://doi.org/10.13204/j.gyjzG20011603.
WU Lei, YANG Wei, SUN Yuan, et al. Ind Constr(in Chinese). 2020: 1–10. https://doi.org/10.13204/j.gyjzG20011603.