

土木工程学院2022年度科学报告会

3D打印纤维混凝土材料力学性能 及梁受弯试验

岳健广

jgyue@njtech.edu.cn

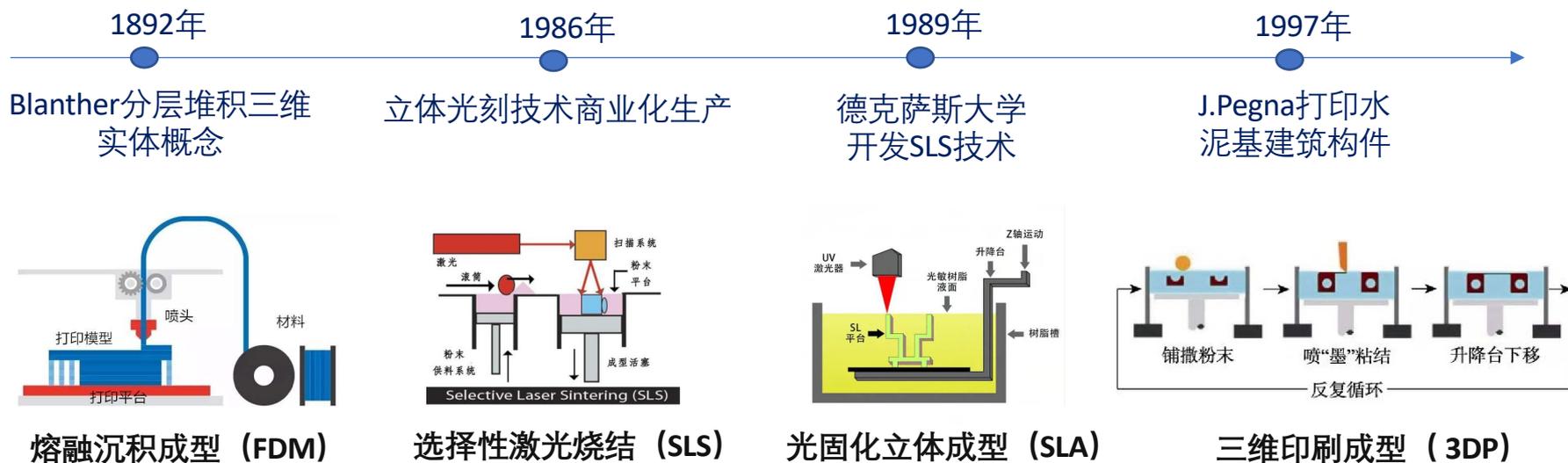
南京工业大学土木工程学院

2022年12月29日

一、增材制造概况

增材制造概况 – 发展历程

增材制造 (Additive Manufacturing , AM) 俗称**3D打印**，融合了计算机辅助设计、材料加工、成型技术、以数字模型为基础，**通过软件与数控系统**将专用的金属材料、非金属材料以及医用生物材料，按照**熔融、烧结、光固化、喷射**等方式逐层堆积成实物的制造技术。



轮廓工艺
(Khoshnevis , 2001)



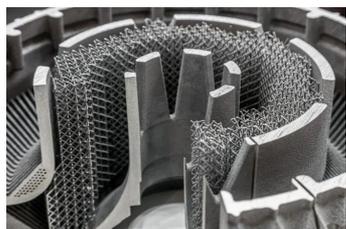
D型工艺
(Kini , 2007)



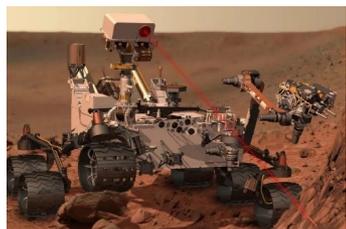
混凝土打印工艺
(Lim和Buswell , 2008)

增材制造概况 – 价值意义

3D打印技术综合性强，涉及材料学、机械工程学、电子信息工程学、信息技术学、工业设计学



机械制造



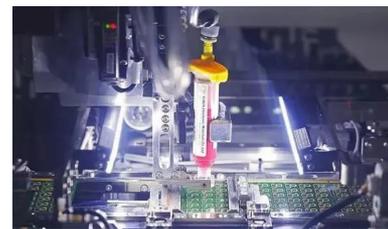
航空航天



建筑业



生物医药



电子工业



2018第一届RILEM混凝土与数字制造国际会议



2021年3D打印混凝土材料与结构国际会议



德国《国家工业战略2030》



中国《中国制造2025》



美国国家增材制造创新中心

具有与互联网、大数据、人工智能融合集成的天然优势，是未来数字化制造业的核心技术

政策导向

2016年国务院《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》：重点打造增材制造产业链

2017年工信部、发改委《增材制造产业发展行动计划》：全面推动增材制造产业发展具有重大意义

2021年国务院《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》：提升增材制造在制造业核心竞争力，将增材制造作为未来规划发展的重点领域

《“十四五”住房和城乡建设科技发展规划》：推动智能建造与新型建筑工业化协同发展，加速发展建筑用3D打印设备技术和材料，推动高韧性3D打印混凝土在建筑构件和部品中的应用技术”。

截止2021年，各部委及地方政府共发布80余份增材制造相关政策文件

产业发展

2021年全球增材制造市场规模达到 **152.44 亿美元**，相比2020年增长19.5%，过去4年（2018-2021）**平均增长率为20.4%**

2021年我国增材制造企业营收约 **265 亿元**，近四年**平均增长率30%**，目前上市公司有22家

趋势：

- **产业融资**需求迫切（预计2022年我国将超70亿）
- **工业级装备**呈现大尺寸、高效率、专用化（建筑用机械摇臂材料挤出装备等）
- 服务市场规模持续扩大，**机械、建筑**等领域将迎来爆发



图1 近四年中国增材制造产业营收情况

二、增材建造研究现状及进展

建筑增材制造研究现状及进展 – 水泥基类材料

3D打印混凝土：水、胶凝材料、骨料、纤维、外加剂、矿物参合料。

分类	优势	不足	改性材料
硅酸盐水泥	强度高，耐冻，干缩小 (LETT, 2012)	水化时间长，脆性大	促凝剂、纤维、粘度改性剂
硫铝酸盐水泥	早强快硬、高强抗冻、抗渗、耐蚀、粘结性好 (CHEN M X, 2016)	凝结过快	促凝剂、缓凝剂、粘度改性剂
磷酸盐水泥	快凝早强，粘结性好 (COLOMBO P. 2017)	凝结过快	缓凝剂
土聚水泥	高强、耐高温、节能环保 (ZHONG J, 2017)	凝结过快	氧化石墨烯、粘度改性剂
氯氧镁水泥	凝结硬化快、高强、耐高/低温 (张翠苗, 2014)	水化热高、耐水性差	玻璃纤维

性能	测试方法	结果表征
泵送性	跳桌流动度试验 (Zhang, 2018)	跳桌流动度
挤出性	连续打印多组多条一定长度的条带(岳健广, 2021)	表面质量
建造性	连续打印多组多层长条，底层明显变形或崩塌时结束(MA G W, 2018)	底层变形或崩塌时的层数
可打印时间	每隔一定时间挤出3D打印水泥基材料，从成功堆叠到阻塞或中断视为可打印时间(MA G W, 2018)	可打印时间

- 中国工程建设标准化协会于2020年发布《**混凝土 3D 打印技术规程**》总结出了3D 打印混凝土配合比的经验设计方法。
- 目前无统一新拌打印水泥基材料的测试方法标准，各研究者根据打印过程，从**泵送性、挤出性、建造性、打印时间**等方面对3D 打印水泥基材料的可打印性进行评价。

建筑增材制造研究现状及进展 – 水泥基类材料

分层制造工艺引入层间界面，导致形成结构薄弱处，致使材料表现各向异性。

层间粘结

Zareiyan , 2017	在层间界面处构造互锁结构， 互锁深度 1.905 cm 以下时，层间粘结强度随互锁深度增加而增加
Keita , 2019	对比分析三点弯曲测试、压缩测试、垫铁片的压缩测试及角钢垫片压缩测试，得出 铁角压缩测试 是最适合表征层间粘结强度的方法
Nerella , 2019	辅助胶凝材料 能提高层间粘结强度，胶凝材料中含有 30% 粉煤灰及 15% 微硅粉时，层间界面结构则有所改善
Marchment , 2019	含有超塑化剂或缓凝剂的水泥浆层可显著提高层间有效粘结面积，并提高层间粘结强度 26% ~ 59%

耐久性能

Weng , 2019	PVA 纤维能有效防止对 3D 打印水泥基材料在 高温 下的剥落、爆裂。
Weger , 2018	3D 打印水泥基材料 抗冻融性能 满足标准要求，在自然及增加 CO2 浓度条件下，试件未发生碳化。

构件增韧



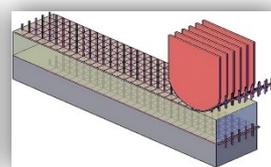
部分钢筋布置



双喷嘴



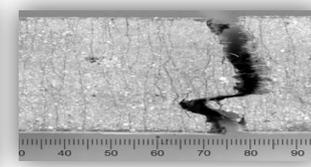
体外预应力钢筋



织物



钢绞线



短纤维

建筑增材制造研究现状及进展 – 水泥基类材料



混凝土营房



迪拜政府大楼



防疫测控方舱



五层公寓楼



龙门式



机械臂式



悬索式



转臂式

存在的问题及思考

- 缺乏考虑 3D 打印水泥基材料特性及其使用场景的**配合比设计方法**。是否考虑将水泥基材料收缩、材料各向异性作为设计目标及内容。
- 尚无法结合打印设备及施工工艺实现**高韧性**建筑结构。
- 而对于 3D 打印水泥基材料的**耐久性能**，尤其是恶劣甚至极端环境下的性能劣化机制及耐久性能研究少有涉及。
- **3D 打印建筑技术相关标准体系**正在逐渐建立，但在这个过程中需注意充分考虑 3D 打印建造工艺及其发展，应基于大量研究应用结果不断完善，从而规范 3D 打印建筑行业的健康发展。

建筑增材制造研究现状及进展 – 金属类材料

国外研究进展：

- NTi 公司采用快速等离子沉积(RPD)技术为B787梦幻客机打印的钛合金构件，每架客机制造成本可节省**200多万美元**
- 欧洲宇航防务集团公司(EADS) 为**空客A380** 打印的不锈钢支架质量比传统铸件低约**40%**，可实现单架机年运营费用等成本降低**数万**美元。
- 空客公司开发了高度集成的**A380 客机方向舵液压阀**，实现单个组件减重**60%**、体积减少**30%**的目标。

国内研究进展：

- 中国商飞公司成功制备了结构优化的**飞机舱门铰链臂零件**，其质量减轻了**35%**以上。
- 中国商飞公司与西北工业大学成功制备了**大型钛合金左翼缘条**，制造周期仅需**20d**，材料利用率高达**95%**以上

国家标准：

- 中国，GBT 35351-2017
- 美国，ASTM F2792-12a

金属增材制造具有**节约成本、轻质、快速高效、变形小**等优势，已广泛用于**航空航天、精密制造**等领域



C919中央翼缘条

由西安铂力特公司制作，达到锻件性能标准，最大变形量小于**0.8mm**



钛合金压力容器

由欧洲 Glenalmond Technologies 公司制造，相比传统节约了**200 kg**的钛合金



钛合金承力构件框

由北航王华明团队利用LMD 技术制造，并获得**国家技术发明一等奖**

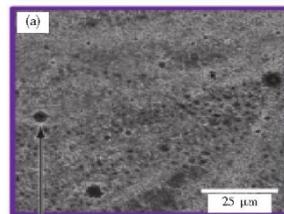


发动机空心叶片

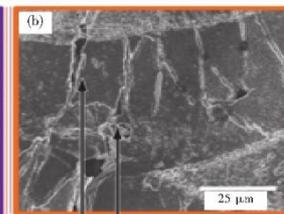
质量约为传统镍基高温合金叶片的一半，每叶片的平均制造时间仅为**7 h**

面临的问题

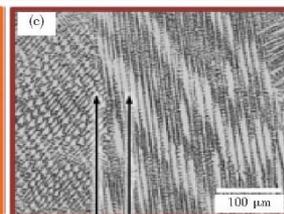
- 打印机及打印原材料昂贵
- 打印制品表面质量差，有几何偏差
- 存在内部缺陷，如孔隙、裂纹，内部不均匀等



(a)孔洞



(b)微裂纹



(c)组织不均匀

建筑增材制造研究现状及进展 – 复合材料类

国外研究进展：

- 德国的Voxeljet公司研发的VX400型打印机可以**24h×7d**不间断工作,能够成型**4000mm×2000mm×1000mm**的大尺寸零部件。
- Electroimpact公司的**自动纤维铺放设备(AFP)**采用**超薄碳纤维预浸带技术**,可以打印最长近**8m**的部件,打印速度可以达到**50m/min**。
- 超级树脂工业团队所打印的碳纤维与热塑性树脂聚乳酸复合材料,体积纤维的占有率为**6.6%**,拉伸强度达到是**200MPa**,增加了6倍。弹性模量达到**20GMPa**,增加了4倍。

国内研究进展：

- 北京化工大学薛平教授表明在3D打印短切玻璃纤维增强聚乳酸复合材料中**玻璃纤维含量在25%**时,其力学性能最好
- 宋星等人采用**光固化3D打印**玻璃纤维增强复合材料,比没有处理过的玻璃纤维拉伸强度提高了50%,弯曲强度提高了143%。

国家标准：

- GB/T 1040.2-2006 《塑料拉伸性能的测定》
- GB50608-2010 《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》



斯特拉迪

材料成本约为3500美元,
耗时44h完成



无人机 SULSA

材料成本约为7000英镑,
飞机重约3公斤



ABS树脂复合材料汽车

13%~30%为碳纤维增强型复合材料,80%~87%为ABS树脂

未来挑战

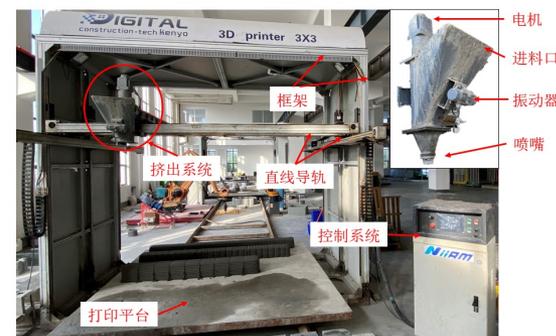
- ① **对线材均匀度有不利影响**：当硬质填充材料的数量超过了某个临界点,在打印过程中会导致表面光洁度比较差甚至是质量缺陷。
- ② **碳纤维填充线材具有易磨损性**,这会导致针对普通非填充 FFF 线材设计的打印机挤出组件快速磨损。
- ③ **纤维含量过高也会阻碍物料流动**,并会增加喷嘴堵塞的风险,导致必须经过维护之后才能使用机器。

短切纤维填充线材所增强效果有限, **连续纤维能够实现零件性能的跨越式改进**。真正实现高强度、高刚度和抗冲击性能。

三、打印碳纤维混凝土力学性能试验

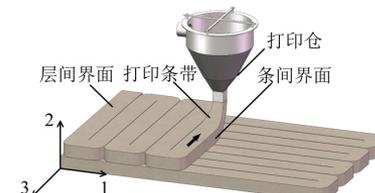
试件制作

配合比	胶砂比	水灰比	硫铝酸盐水泥 (%)	聚羧酸减水剂 (%)	碳纤维体积含量 (%)	消泡剂 (%)	触变剂 (%)	增稠剂 (%)
I	1:1	0.30	5	0.23	0	0.06	0.08	0.12
II	1:1	0.30	5	0.31	0.2	0.06	0.08	0.12
III	1:1	0.30	5	0.35	0.5	0.06	0.08	0.12
VI	1:1	0.30	5	0.40	1	0.06	0.08	0.12



T300SC型号的碳纤维

长度为10 mm，直径为7 μm ，抗拉强度为3530 MPa，弹性模量为230 GPa，密度为1.76 g/cm^3



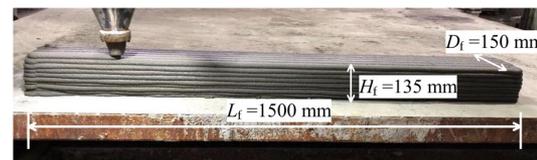
混凝土**可打印性**的评价主要包含两方面：

1) **可挤出性**，是指新拌合的混凝土能够连续均匀地从打印喷嘴中被挤出的性能。目前大多数研究者多采用流动度测试和挤出性测试来评价混凝土的可打印性；

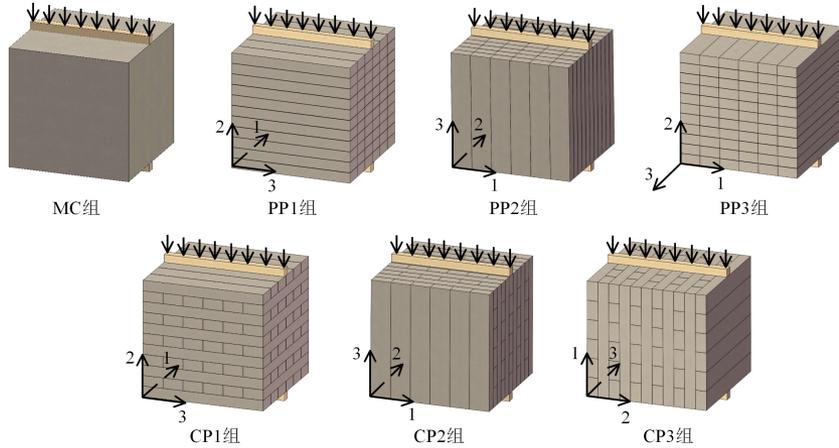
2) **可塑性**，是指打印混凝土在逐层堆积的过程中维持其几何形状稳定，不发生明显变形、倾斜和坍塌的能力。



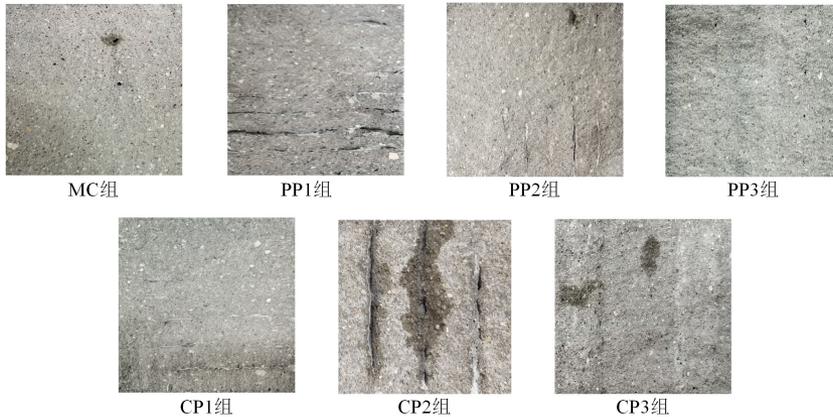
流动度介于
165-175 mm的范围



劈裂抗拉强度



劈裂加载方向



断面破坏形态

浇筑混凝土劈裂抗拉强度标准值

组别	M_f (%)	$f_{sp,k}/\text{MPa}$
MC	0	4.08 (0.04)
	0.37	5.30 (0.05)
	0.92	6.68 (0.02)
	1.83	6.83 (0.02)

打印混凝土劈裂抗拉强度标准值

组别	M_f (%)	$f_{sp,k}/\text{MPa}$		
		1轴	2轴	3轴
PP	0.37	3.24 (0.05)	3.79 (0.03)	5.05 (0.04)
	0.92	3.26 (0.06)	3.80 (0.05)	6.56 (0.03)
	1.83	3.31 (0.06)	3.82 (0.05)	6.57 (0.02)
CP	0.37	4.35 (0.03)	3.15 (0.04)	4.71 (0.03)
	0.92	5.14 (0.04)	3.18 (0.05)	5.83 (0.01)
	1.83	5.70 (0.03)	3.40 (0.05)	5.91 (0.03)

$$f_{sp,pp,1} < f_{sp,pp,2} < f_{sp,pp,3}$$

$$f_{sp,cp,2} < f_{sp,cp,1} < f_{sp,cp,3}$$

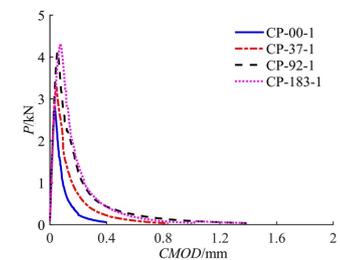
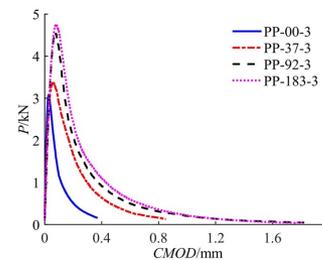
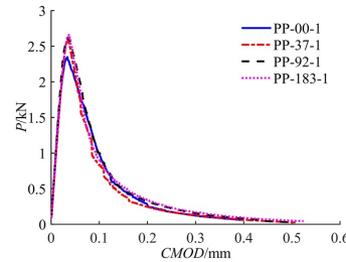
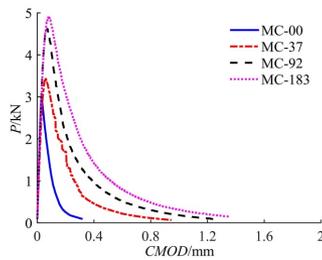
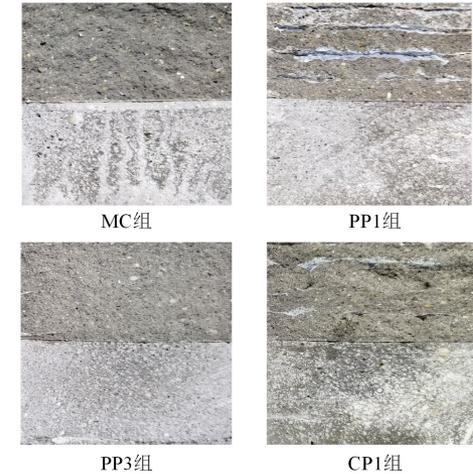
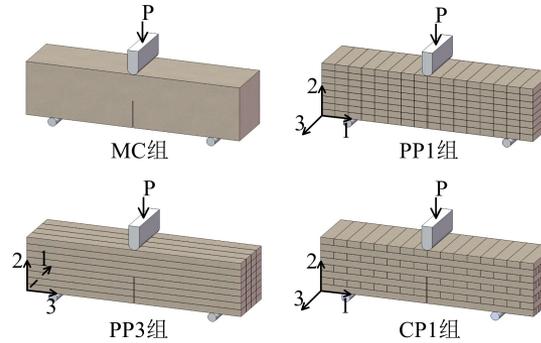
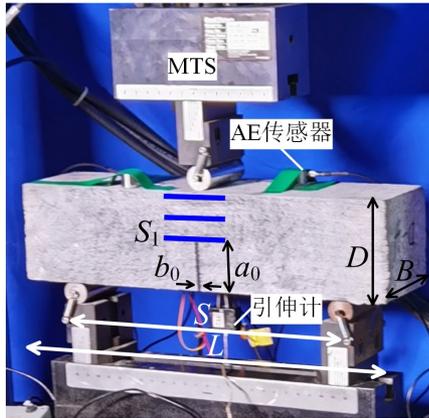
1 (2或3) 方向：PP打印方式混凝土低于 (高于) CP打印方式混凝土的劈裂抗拉强度

$$f_{sp,f,print} = \eta_i \cdot \eta_f f_{sp} \quad \eta_f = 0.166 \ln M_f + 1.553$$

参数 ^①	PP ^②			CP ^②		
	1轴 ^③	2轴 ^③	3轴 ^③	1轴 ^③	2轴 ^③	3轴 ^③
η_i ^④	0.55 (0.07) ^⑤	0.62 (0.08) ^⑤	0.95 (0.01) ^⑤	0.80 (0.04) ^⑤	0.53 (0.07) ^⑤	0.86 (0.02) ^⑤

注：括号内数字表示变异系数。

三点弯加载试验



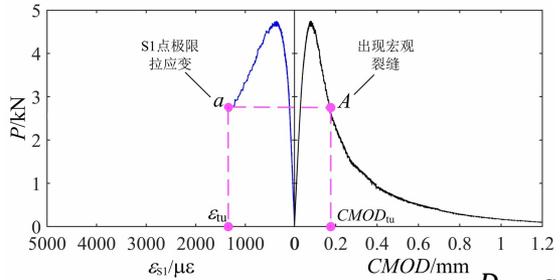
- 打印试块断面上材料的完整性从PP1轴到CP1轴再到PP3轴依次提高，这与上述材料断裂性能大小一致。
- 对于PP打印方式试件，其3轴方向高于1轴方向的纤维桥接作用。
- 在1轴方向，CP打印方式试件高于PP打印方式试件的纤维桥接作用。

- 劈裂抗拉强度、抗弯强度和断裂能均随着纤维含量增大而增大，表明纤维桥接作用随纤维含量的增大而增大。
- 当纤维含量相同时，浇筑试件高于打印试件的纤维桥接作用

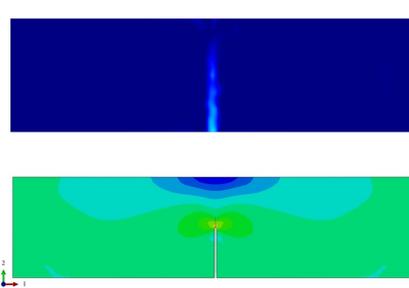
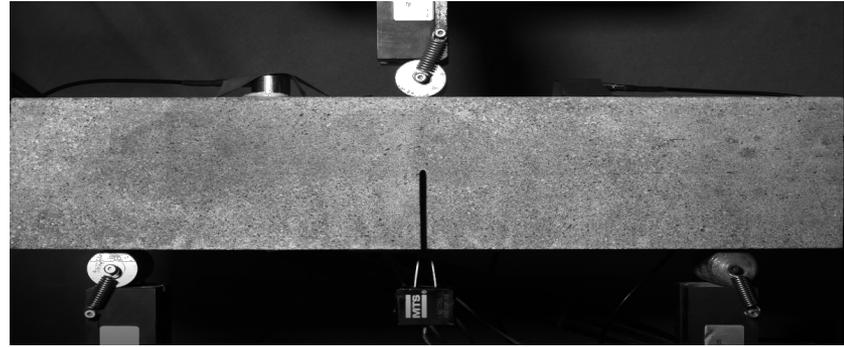
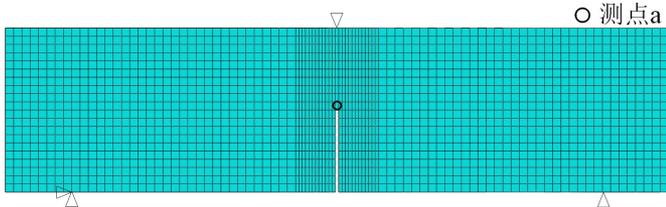
$$\mathcal{F}_{f,\text{print}} = \gamma_i \cdot \gamma_f \mathcal{F}$$

三点弯加载试验模拟

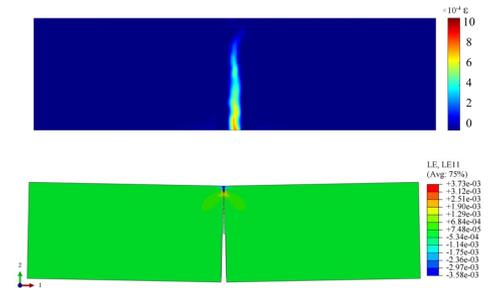
ABAQUS软件、八节点六面体线性减缩积分单元 (C3D8R)、位移加载模式、粘聚力模型



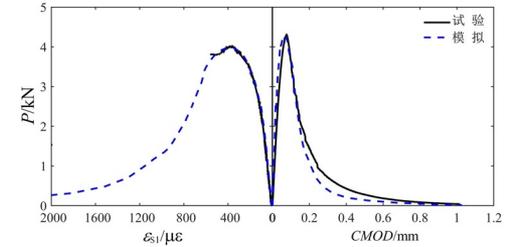
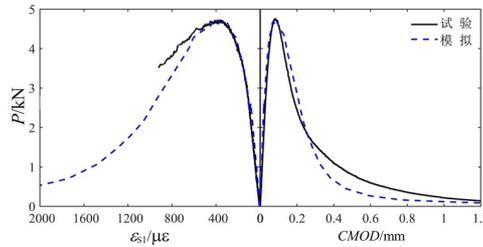
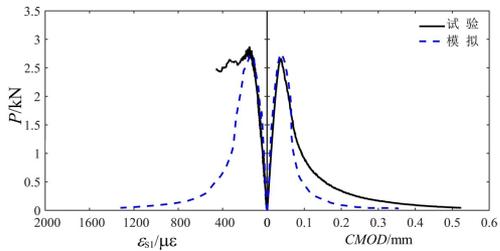
$$f_t = 2G_f/w_0 \quad CTOD = CMOD \cdot \frac{D - a_0}{D}$$



CMOD = 0.16 mm

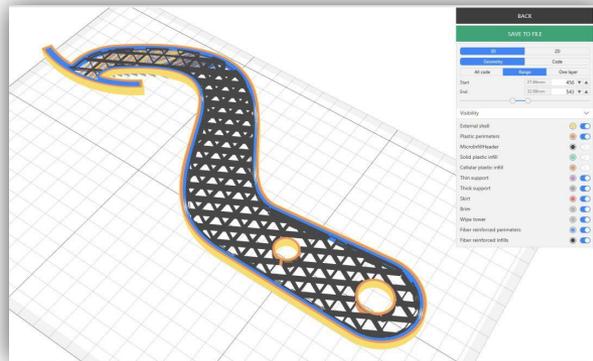
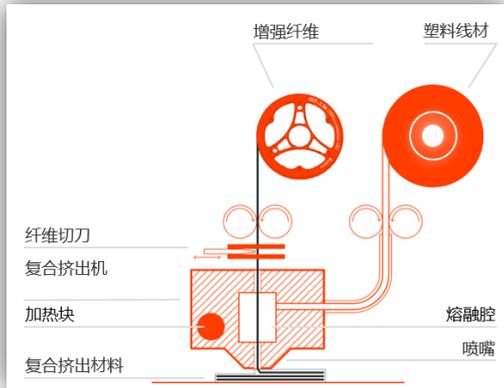


CMOD = 0.82 mm



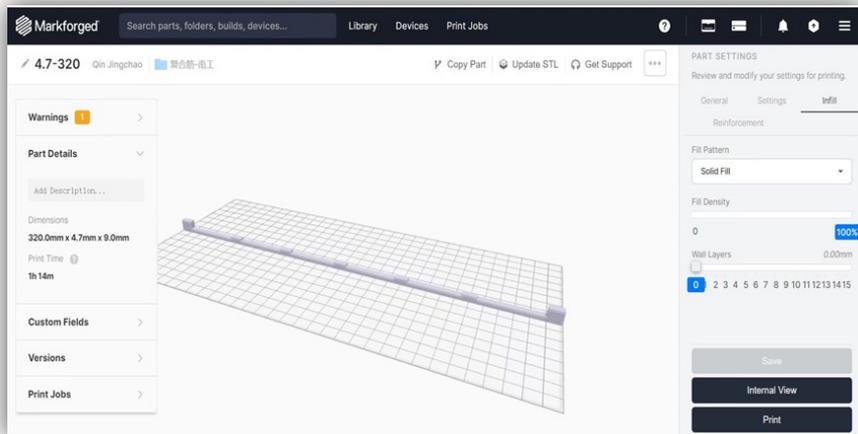
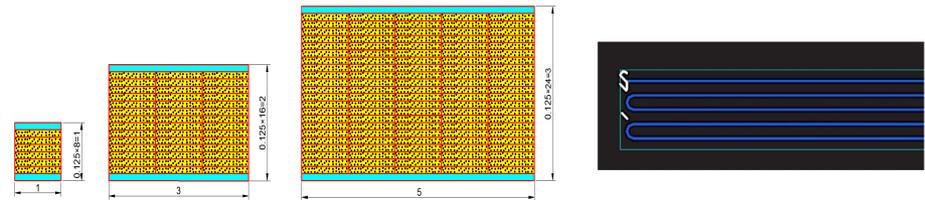
四、打印碳纤维材料受拉性能试验

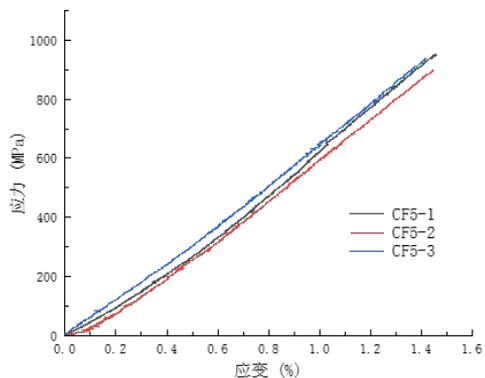
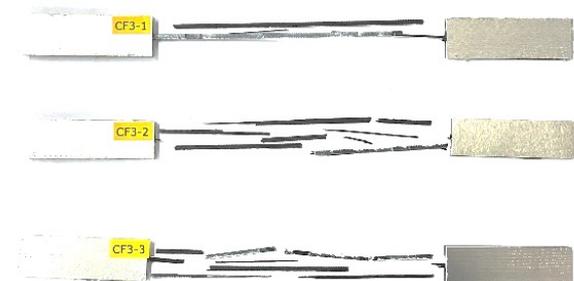
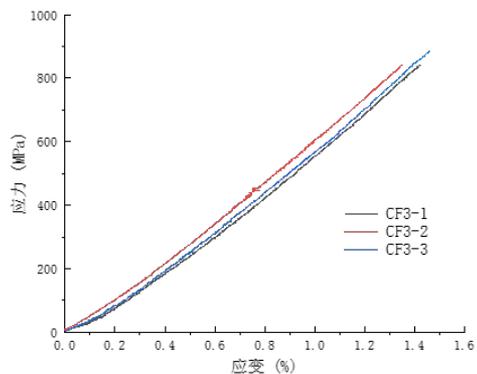
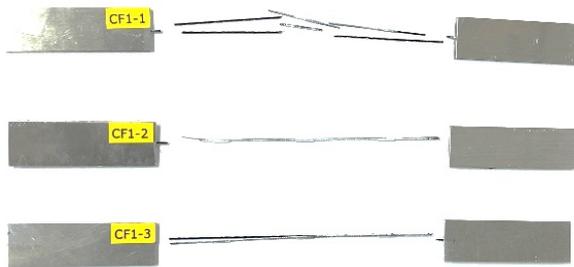
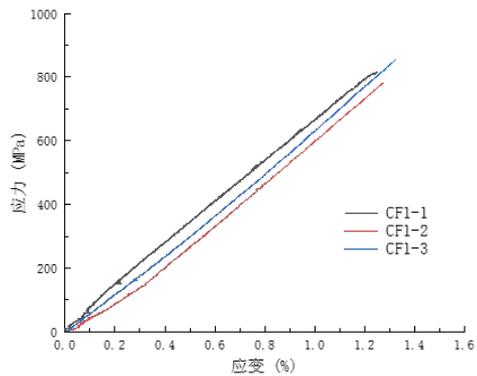
复合材料连续纤维3D打印



连续纤维3D打印技术原理

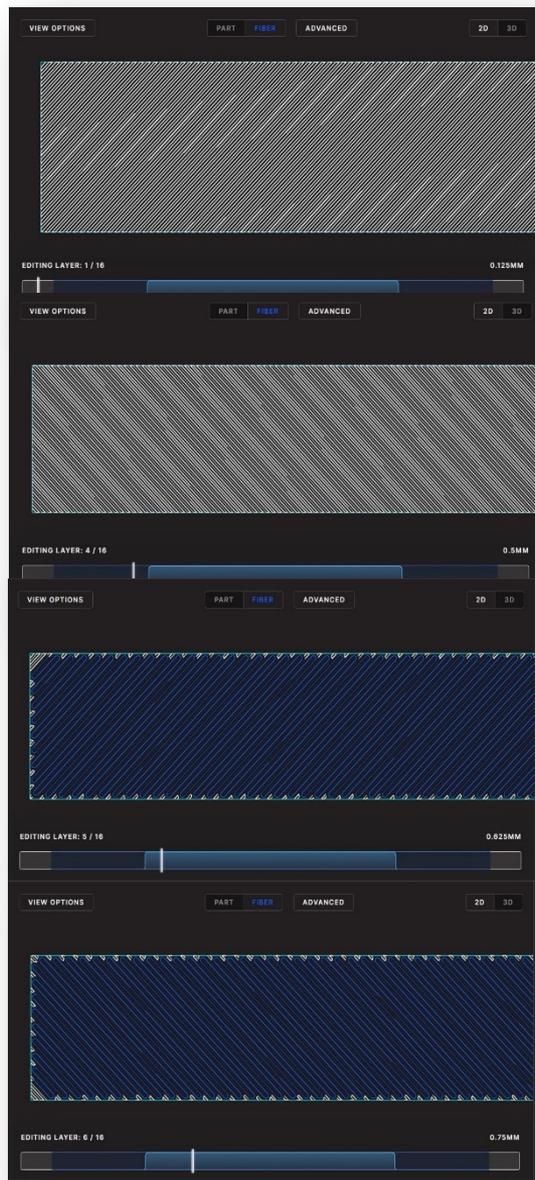
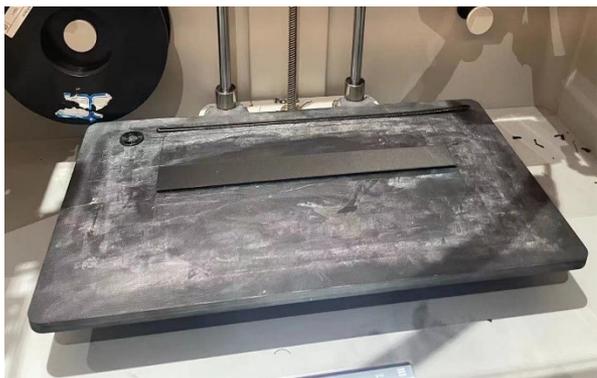
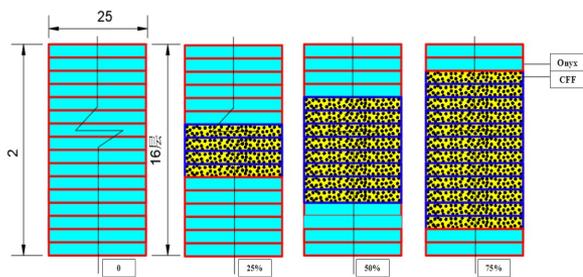
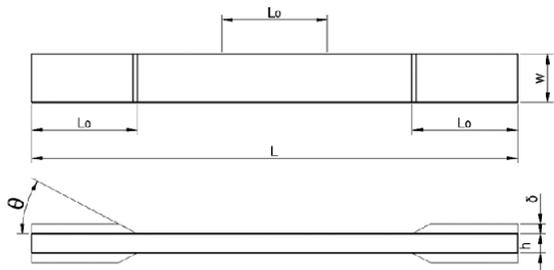
碳纤维丝弹性模量60 GPa, 抗拉强度800MPa
强度是铝的2倍, 重量是铝的1/2, 钢的1/7



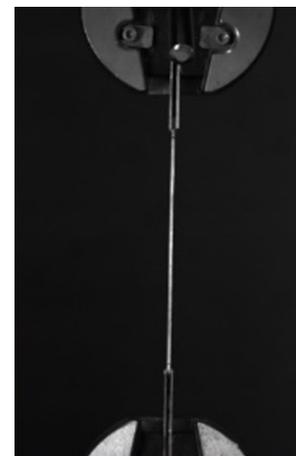


破坏现象：
3DP-CFRP筋中纤维断裂和纤维层之间撕裂。

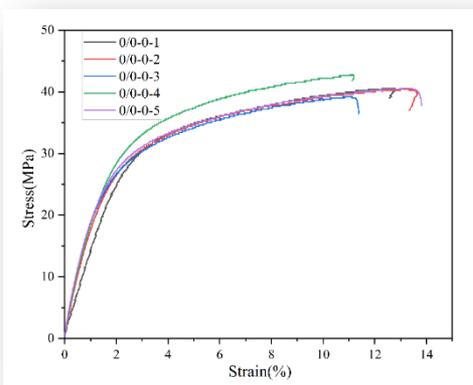
纤维打印条之间粘合程度低于原线材中碳纤维丝与树脂之间的粘合程度，因此纤维筋最终拉伸强度有所削弱。



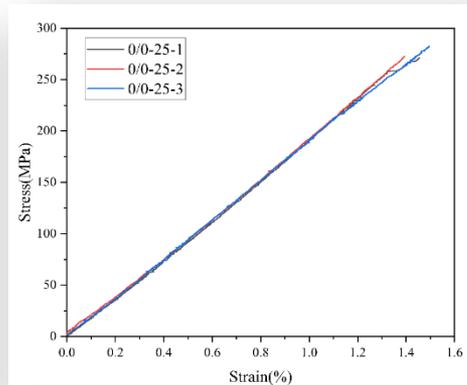
基础线材



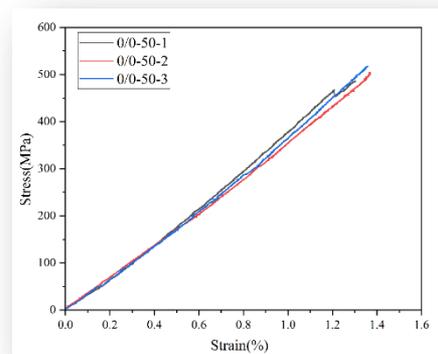
打印CFRP复材



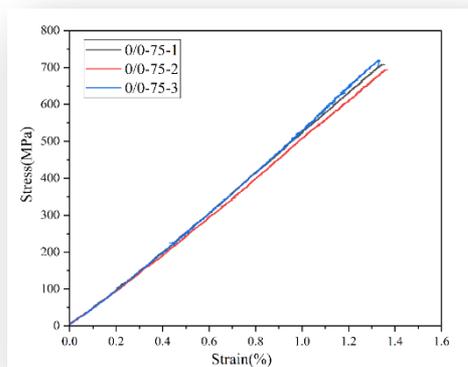
Onyx对照



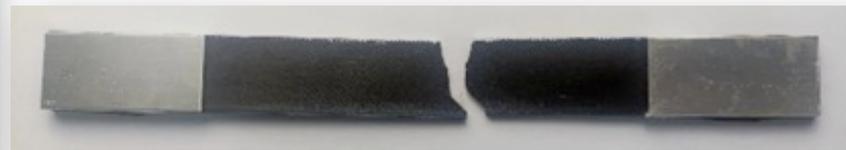
0/0-25



0/0-50



0/0-75



(a)0/0-00



(b)0/0-25



(c)0/0-50



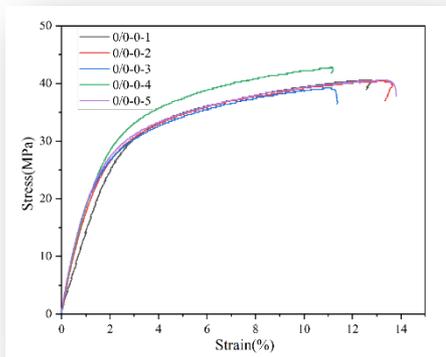
(d)0/0-75

破坏形态

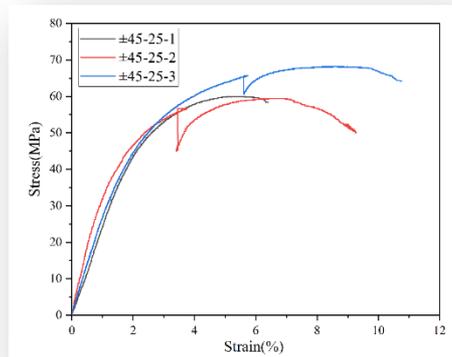
应力-应变曲线

$$\sigma_t = f_t(1 - e^{-k\varepsilon_t})^\lambda$$

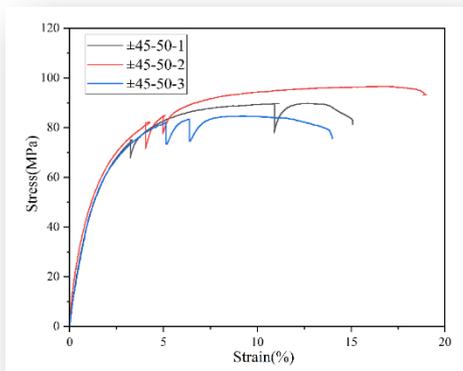
$$E = V_f E_f + (1 - V_f) E_m$$



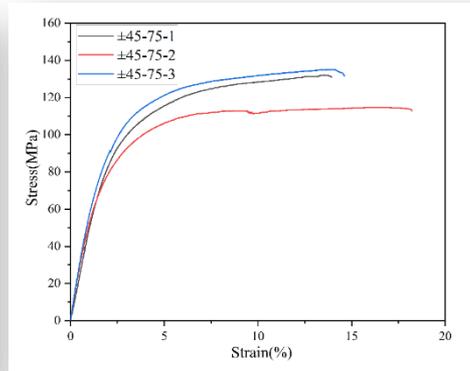
Onyx对照



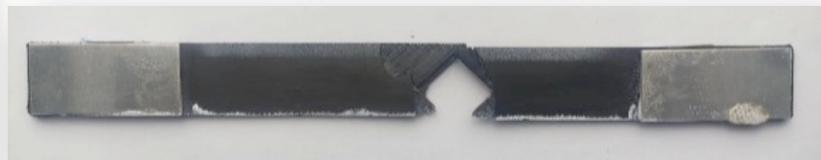
±45-25



±45-50



±45-75



(a) ±45-25



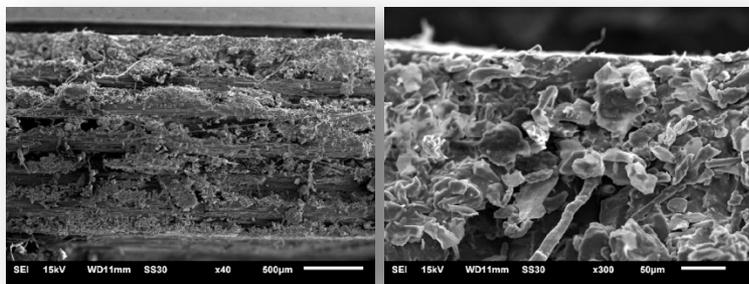
(b) ±45-50



(c) ±45-75

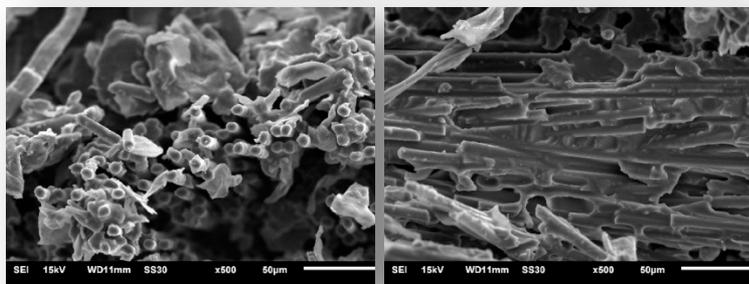
【±45】组断口宏观破坏

【±45】组应力-应变曲线



(a)

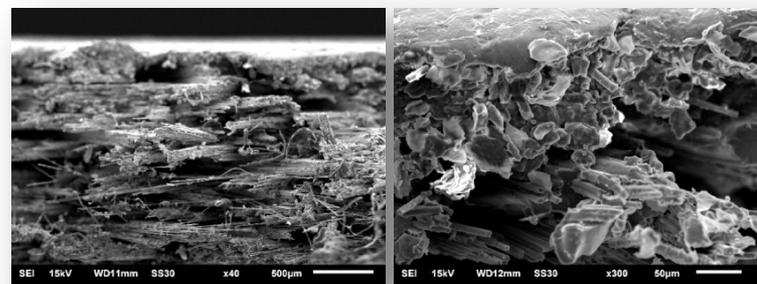
(b)



(c)

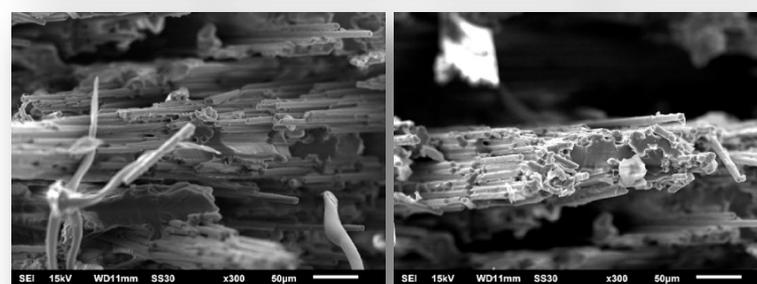
(d)

[0/90]组试件断口微观形貌



(a)

(b)



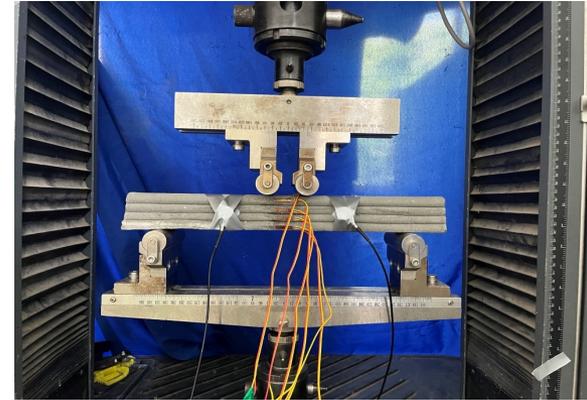
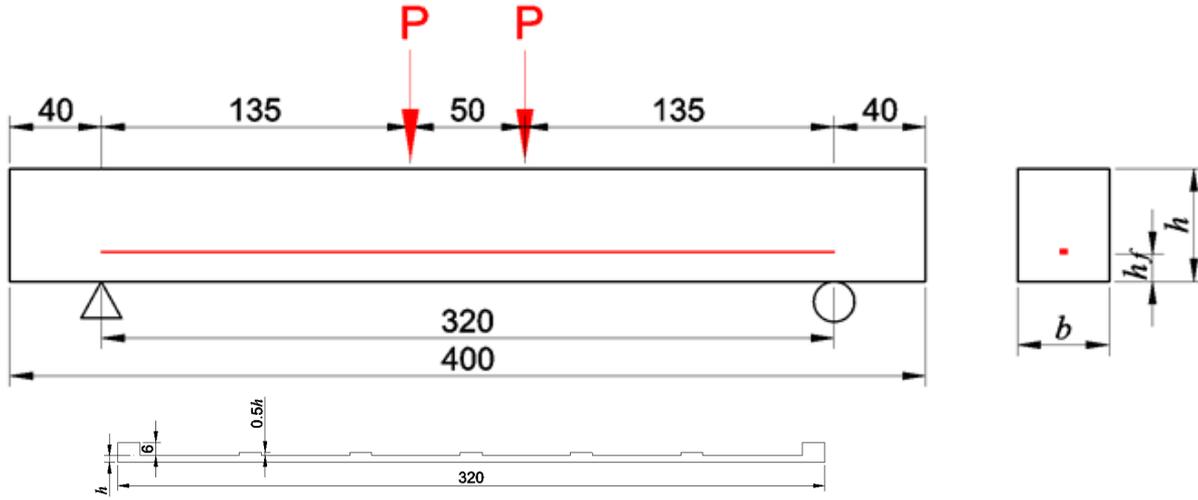
(c)

(d)

[±45]组试件断口微观形貌

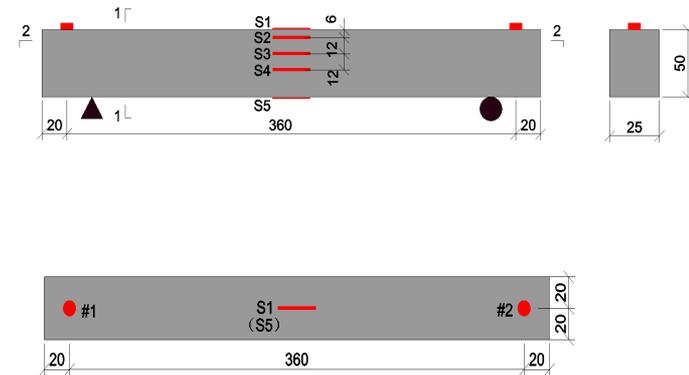
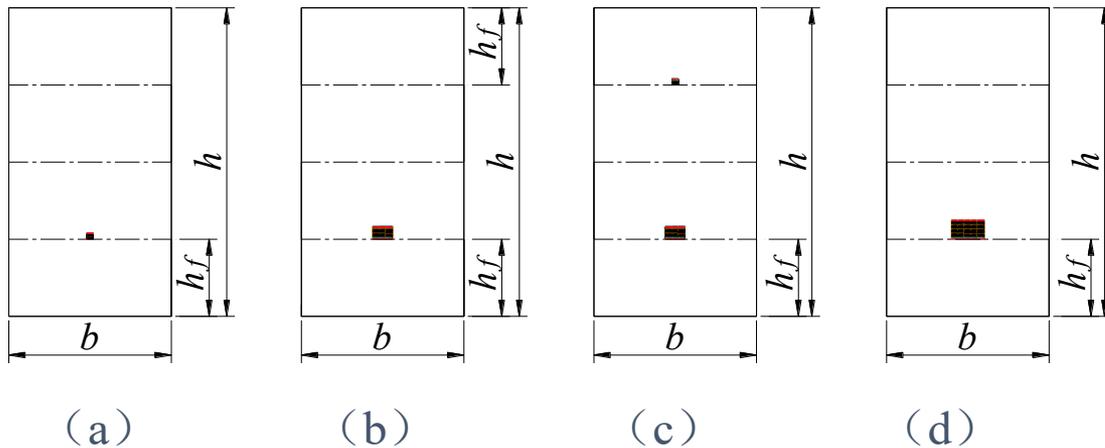
五、打印碳纤维筋碳纤维砼梁 受弯试验

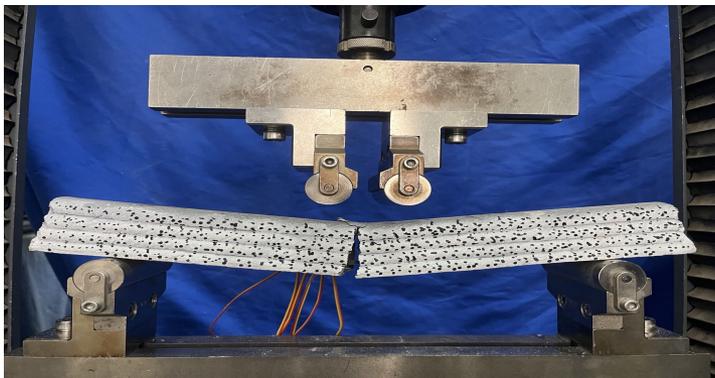
3D-CFRP-RC梁试验概况



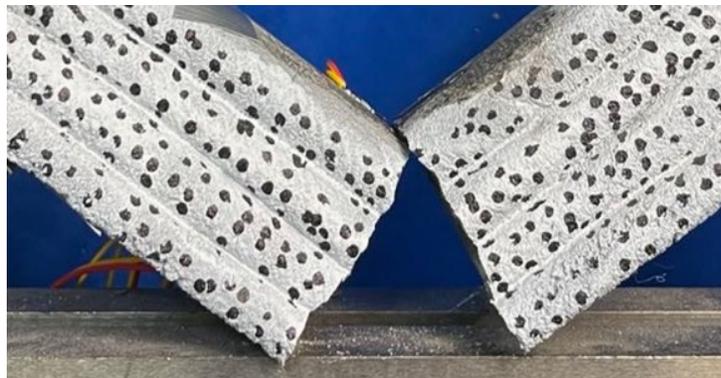
碳纤维体积含量 $V_f=0\%$ 、 0.2% 、 0.5% 和 1%

配筋率： 0.04% 、 0.26% 、 $0.26\% + 0.04\%$ 和 0.69%





试验全貌



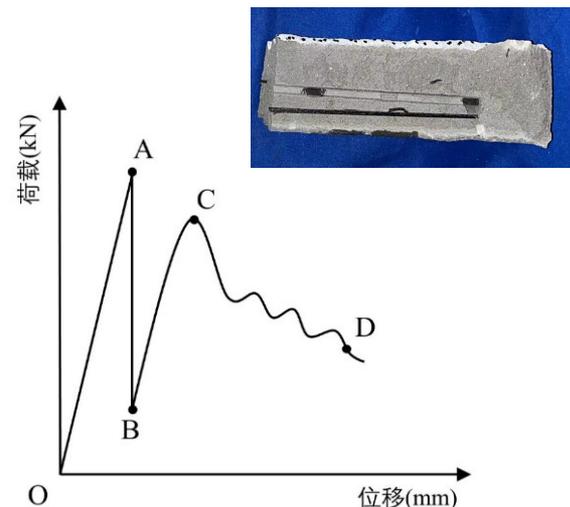
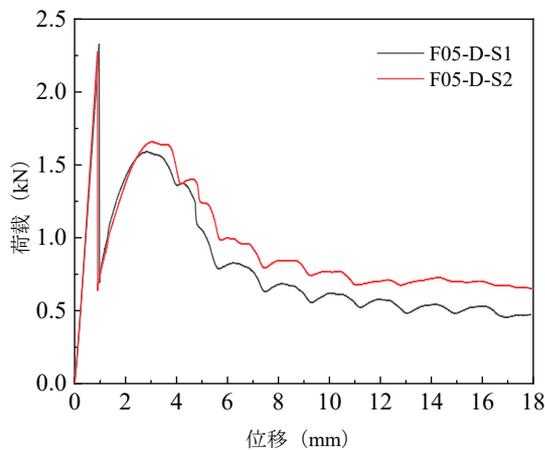
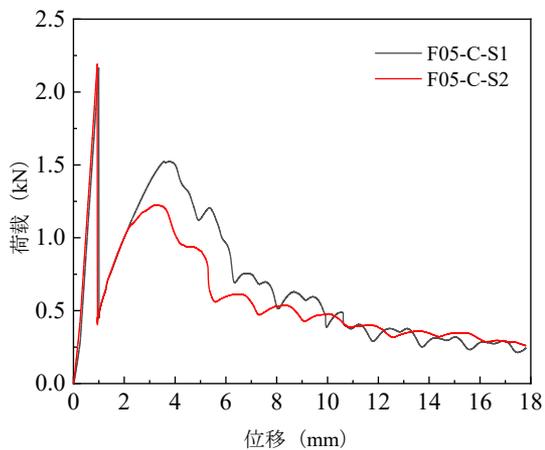
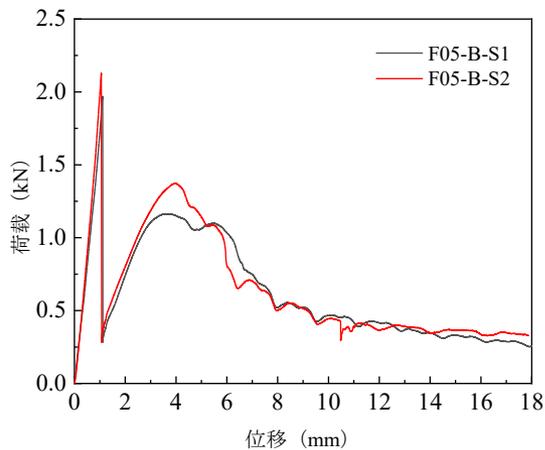
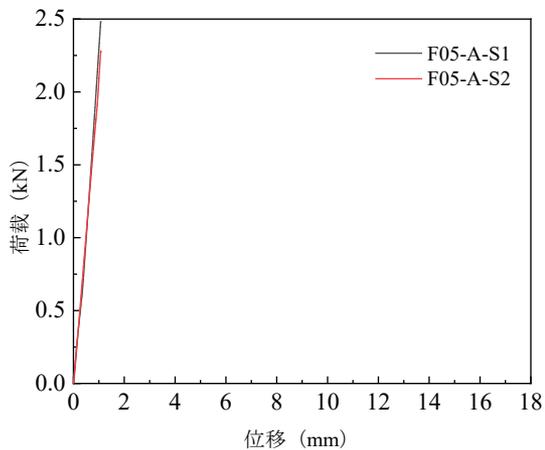
CFRP筋拉断



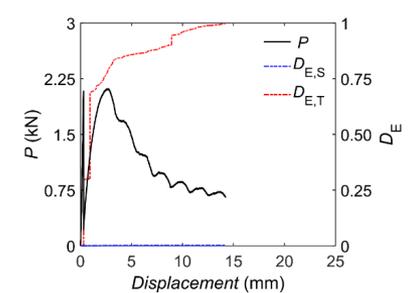
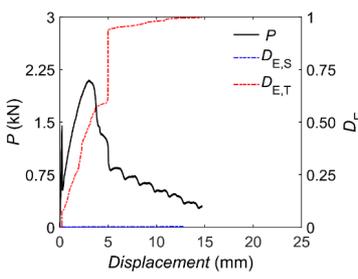
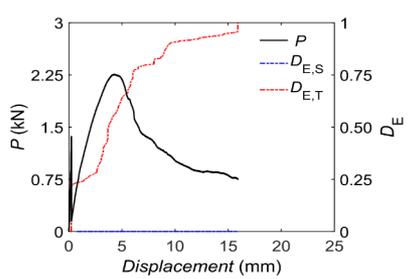
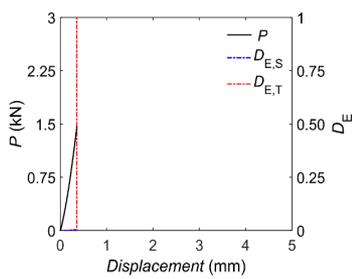
CFRP筋拔出



混凝土打印层间剥落



- (1) 弹性阶段OA ;
- (2) CFRP筋“肋”锚固失效阶段AB , “保险丝作用” ;
- (3) 带裂缝工作阶段BC ;
- (4) 破坏阶段CD.



CFRP筋混凝土梁抗弯承载力

破坏荷载试验值和计算值对比

组号	$V_f(\%)$	$P_{cal,u}(kN)$	$P_u(kN)$	$P_{cal,u}/P_u$
B	0	2.40	2.17	1.11
	0.2	2.41	1.48	1.63
	0.5	2.41	1.54	1.56
	1	2.41	1.78	1.35
C	0	2.49	2.09	1.19
	0.2	2.50	1.29	1.94
	0.5	2.50	1.37	1.82
	1	2.50	1.19	2.10
D	0	3.34	2.05	1.63
	0.2	3.48	1.75	1.99
	0.5	3.51	1.65	2.17
	1	3.62	1.5	2.42

开裂荷载试验值和计算值对比

$V_f(\%)$	$P_{cal,cr}(kN)$	$P_{cr}(kN)$	计算误差
0	1.38	1.46	5.48%
0.2	1.72	2.015	14.64%
0.5	2.24	2.37	5.49%
1	2.24	2.11	-6.16%

- 短切碳纤维对微裂缝能够发挥桥接作用，增强混凝土韧性。配筋率的提高，荷载位移曲线后期更加缓和，增强试件的延性。
- 3D打印CFRP-RC梁在四点弯荷载作用下的破坏过程分为四个阶段：弹性阶段；打印CFRP筋“肋”锚固失效阶段；带裂缝工作阶段；破坏阶段。
- 试件在弹性阶段的损伤较小，在其他阶段试件损伤急剧增长，再趋于平缓。

六、工程应用

项目工程应用情况

 **市政设施**：社区中心、公交站台、公共厕所、门卫亭、垃圾分类房、爱心献血屋、河道护坡、水泵房



湖北襄阳爱心献血屋



上海苏州河堤防护坡，
功能与美观相结合



湖北宜昌茶庵片区泵房
解决240户村民用水问题



连云港某小区垃圾分类房



马鞍山市慈馨家园小区
垃圾分类房



连云港某小区碳中和体验馆



连云港龙都花园小区垃圾分
类房



连云港某小区垃圾分类房

项目工程应用情况



景观装饰：城市景观小品、室内装饰、公共休闲设施、田头棚



江苏灌南县乡风文明雕塑小品，
传统金属雕塑成本的1/10



广州宝悦宝马、扎哈建筑，粗糙质感营造粗犷沙漠风



休闲桌椅



东大成贤学院休闲吧



田头棚，白色外观与绿野呼应，
安全美观



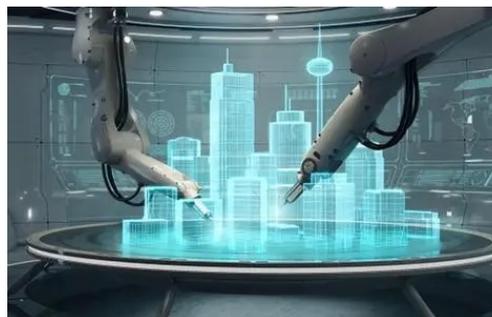
户外汀步

绿色智能化装配式3D打印建造

我国经济发展已由高速增长阶段转向高质量发展阶段，进入装配制造业革命阶段。人口红利逐渐消失、人力资源成本快速提高，建筑业正向新型建筑工业化模式转变。

3D打印制造技术，能够**充分结合人工智能、机器人、互联网技术**，实现**房屋建筑的智能化、数字化建造**，大幅度降低人力成本，快速建造，减少建筑垃圾，**结构性能达到抗震设计要求**。

MPC 3D打印材料及制造技术，对于建造**异形建筑、复杂空间节点、装配式建筑构件/部品**，具有显著优势，无需模板，整体成型，建造效率高，节省材料，适用于**装配式建筑业、艺术性建筑、房屋快速建造**。



文物古建修复与仿复制

中国古建筑在世界建筑中独树一帜，具有极高的艺术成就和科学价值，也是旅游业的重要物质基础。我国现存古建筑有8万多处，各类文物数不胜数。

竹木纤维3D打印技术，可以结合BIM、Solidworks，1:1打印复杂木结构构件、节点，并具有高强、耐腐蚀、延性好的优点，**精确修复古木结构。**

利用三维扫描采集文物古迹的点集，输入计算机进行过滤和建模，最终应用于**文物古建的保护和修复。**

传统工艺在修复文物时直接在表面上操作，容易造成对文物的二次损伤。而3D打印技术，可以在不接触文物的前提下，通过立体扫描、数据采集、绘画模型打印等一系列步骤，对**文物修补和复制。**



谢谢大家！