

文章编号:1007-9629(2025)03-0210-07

## 原位涂层钢筋增强 3D 打印混凝土握裹力

崔宏志<sup>1,2,3</sup>, 曹乐乐<sup>1,2,3</sup>, 曹香鹏<sup>1,2,3\*</sup>, 巫烁理<sup>1,2,3</sup>

(1. 深圳大学 滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 广东 深圳 518060; 2. 深圳大学 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室, 广东 深圳 518060; 3. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060)

**摘要:**为解决直接插入钢筋增强 3D 打印混凝土技术中的空隙问题,提出了原位涂层技术.分别使用自密实砂浆与超细灌浆水泥作为原位涂层材料,制备了原位涂层钢筋增强 3D 打印混凝土,研究了钢筋在混凝土中的拉拔性能.结果表明:使用水泥基材料对钢筋进行原位涂层,可以得到密实的钢筋-混凝土界面,与直接插入技术相比,拉拔强度得到了最大 345.0% 的提升;钢筋拉拔曲线符合常规的四段式.这证明使用水泥基材料的原位涂层技术可以实际应用于 3D 打印混凝土的加筋工艺中,并有效提升 3D 打印混凝土结构的力学性能及耐久性能,为混凝土 3D 打印技术的工程应用提供了创新方法及理论基础.

**关键词:**3D 打印混凝土;原位涂层;自密实砂浆;超细灌浆水泥;加筋增强技术

中图分类号:TU502<sup>+.6</sup>

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.03.003

## Bond Behavior of In-Situ Coated Rebars in 3D Printed Concrete

CUI Hongzhi<sup>1,2,3</sup>, CAO Lele<sup>1,2,3</sup>, CAO Xiangpeng<sup>1,2,3\*</sup>, WU Shuoli<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory for Resilient Infrastructures of Coastal Cities(MOE), Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;  
2. State Key Laboratory of Subtropical Building and Urban Science, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;  
3. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** To address the gap issue between the directly-inserted rebars and printed concrete, an in-situ technique was proposed to coat the inserted rebars to diminish the voids and enhance the bonding performance. The self-compact mortar and ultra-fine grouting cement were separately used as the in-situ coating materials to prepare in-situ coated rebar-reinforced 3D printed concrete. Experimental results shows that dense contact was established between the rebar and the composite, and the bonding strengths were maximally improved by 345.0% higher than that of the direct-inserted rebars. The bond-slip behavior of the steel bar conforms to the conventional four-segment curve pattern. These findings indicate that the cement-based in-situ coating technique is highly effective for reinforcing 3D printed concrete, significantly enhancing its mechanical properties and long-term durability. This innovative approach provides both a practical solution and a theoretical foundation for the engineering application of concrete 3D printing technology.

**Key words:** 3D printed concrete; in-situ coating; self-compact mortar; ultra-fine grouting cement; reinforcing technique

挤出式 3D 混凝土打印技术的研究已开展多年<sup>[1]</sup>.但 3D 打印混凝土(3DPC)层间附着力较弱<sup>[2]</sup>,且缺乏加强筋笼<sup>[3]</sup>,因此降低了其力学性能,使其无法得到广泛应用.目前,可以通过控制表面湿度<sup>[4]</sup>、

收稿日期:2024-04-12;修订日期:2024-06-11

基金项目:深圳市基础研究重点项目(JCYJ20200109114203853);深圳市科技计划项目(KQTD20200909113951005)

第一作者:崔宏志(1974—),男,山西太原人,深圳大学教授,博士生导师,博士.E-mail:h.z.cui@szu.edu.cn

通讯作者:曹香鹏(1985—),男,山东日照人,深圳大学实验师,硕士生导师,博士.E-mail:caoxp@szu.edu.cn

改变打印参数<sup>[5]</sup>、层间刷水泥净浆<sup>[6]</sup>来提高3DPC层间黏结力.也可在水泥砂浆挤出并堆叠后立即插入短而硬的纤维或钢筋来增强3DPC,经测试钢筋拔出强度为5~7 MPa,远低于浇制钢筋混凝土(29 MPa)<sup>[7]</sup>.虽然插入的钢筋<sup>[8-9]</sup>、纤维<sup>[10-11]</sup>和金属钉<sup>[12-13]</sup>显著改善了3D打印梁的弯曲性能,但是这些加强筋的周围存在大量空隙<sup>[14]</sup>,钢筋插入越深,其上部空隙就越大,钢筋与3DPC的黏结性能也就越差<sup>[14]</sup>.另外,加强筋插入混凝土的操作并不完全稳定,操作偏差会进一步扩大空隙.有研究在插入钢筋之前涂一层水泥净浆<sup>[15]</sup>,最大可消除47%~56%的空隙.也有研究将钉子旋转拧入砂浆<sup>[13]</sup>,或在钢筋上涂刷黏合剂<sup>[6, 16-17]</sup>.但这些技术并没有完全消除插入空隙.而且插入空隙是连续的<sup>[18]</sup>,有害离子可以通过空隙渗入<sup>[19]</sup>,导致钢筋锈蚀,严重降低了3DPC结构的耐久性能<sup>[20]</sup>.

本文提出一种原位涂层技术,在钢筋插入的过程中,使用涂层材料为钢筋添加涂层,涂层材料与混凝土同步固化,最终消除钢筋与3DPC之间的空隙缺陷,增强钢筋与3DPC的黏结.本文选用自密实砂浆(SCC)与超细灌浆水泥(GRC)作为原位涂层材料(具有高流动性),其与新打印的3DPC(具有低流动性)及钢筋(无流动性)之间均可实现密实接触.并对钢筋拉拔性能进行试验研究,揭示原位涂层钢筋3DPC的黏结特性,以期原位涂层技术的工程应用

提供理论基础.

## 1 原位涂层技术

原位涂层技术的具体实现如图1(a)所示.首先,将通心管直接插入新打印的3DPC中.为防止气泡产生,先在钢筋表面涂刷一层涂层材料,再将钢筋放置于通心管中.然后,往通心管中浇入涂层材料,并旋转钢筋使涂层材料充分渗入,填满通心管与钢筋之间的空隙.最后,将通心管缓慢旋转抽出,使钢筋及涂层材料留置于3DPC中,即完成了钢筋的原位涂层.

涂层材料将钢筋全面包裹并充分填充了混凝土空间,通心管的外壁直径就是涂层钢筋的最外层直径.原位涂层材料必须在液态时具备较高的流动性,并在固态时与钢筋和3DPC具有高效的黏结能力.笔者前期的研究中使用了环氧树脂作为涂层材料,使钢筋和3DPC的握裹力得到了有效提升<sup>[21]</sup>.但无机胶凝材料在耐久性能方面与混凝土具有更好的兼容性.

在工程应用中,原位涂层技术可以与3D打印操作同步进行,如图1(b)所示.使用2台机械臂分别实现混凝土的3D打印与钢筋的原位涂层并植入.原位涂层材料也可以设计为固液双组份,通过输送管道在涂层机内部混合使用.2台设备共同配合,可制备带有原位涂层加强筋的3DPC结构,从而有效解决3D打印混凝土结构中加强筋的空隙问题.

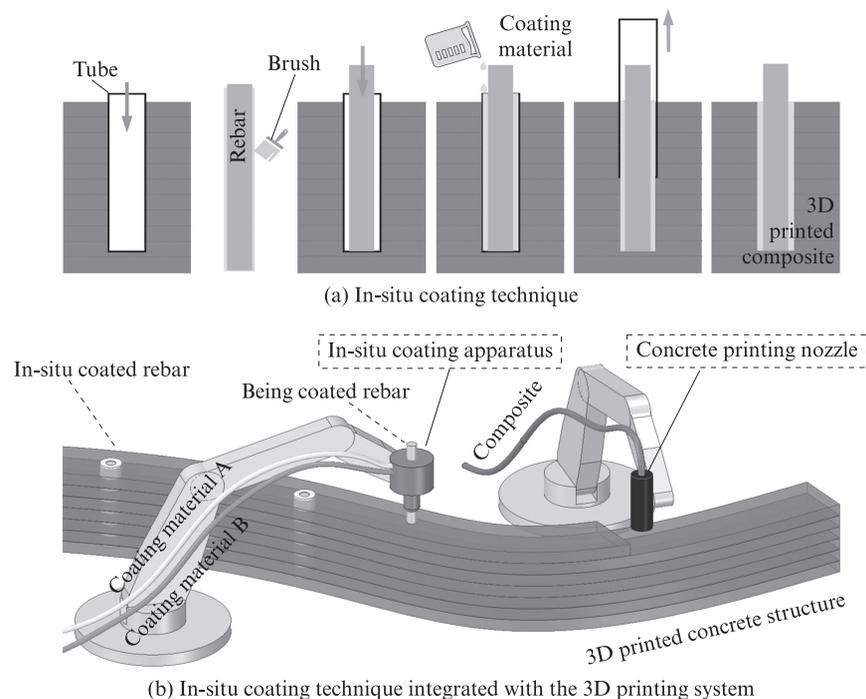


图1 原位涂层技术及应用示意图

Fig. 1 In-situ coating technique and its application

## 2 试验材料及方法

### 2.1 3D打印混凝土材料

采用普通硅酸盐水泥 OPC 42.5R 作为胶凝材料,购自佛山,28 d 抗压强度 48.5 MPa.采用空心玻璃珠(HGB)作为细骨料(代替细砂),平均粒径 80  $\mu\text{m}$ ,密度 0.60  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,以降低 3DPC 密度、提升可建造性,并通过其光滑的外观提高挤出效率.粉煤灰(FA),II 级,细度 43  $\mu\text{m}$ ,密度 2.7  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,比表面积 0.36  $\text{m}^2/\text{g}$ ,含水量 0.5%.硅灰(SF),密度 2.2  $\text{g}/\text{m}^3$ ,平均粒径 0.1~0.3  $\mu\text{m}$ ,比表面积 20~28  $\text{m}^2/\text{g}$ ,活性指数 98.4%.FA 和 SF 用来提高砂浆的和易性.使用

聚羧酸高效减水剂(HRWR)和增稠保水剂羟丙基甲基纤维素(HPMC,黏度 6  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )来提高砂浆黏度<sup>[22-23]</sup>,改善可打印性.使用增塑剂聚丙烯酸钠(PA)来提高可塑性.使用促凝剂碳酸锂(AR)来加速水化进程.使用硅酸镁铝  $\text{MgAl}_2(\text{SiO}_3)_4$  作为触变剂(TA)来增加材料触变性,使浆料在挤出过程中有较高的流动性.此外,还使用了消泡剂(DFA)来减少搅拌和打印过程中产生的气泡.3DPC 的配合比如表 1 所示.前期测试结果表明,按照表 1 配合比,常规浇制混凝土和 3DPC 的抗压强度分别为 21.6、18.8 MPa(试件为边长 40 mm 立方体,养护 28 d,加载速率 2 mm/min).

表 1 3DPC 的配合比  
Table 1 Mix proportion (by mass) of 3DPC

Unit: %										
OPC	HGB	FA	SF	Water	HRWR	HPMC	PA	AR	TA	DFA
54.40	10.88	8.16	2.73	21.76	0.11	0.16	0.54	0.41	0.82	0.03

按 ASTM C780-20 *Standard Test Method for Preconstruction and Construction Evaluation of Mortars for Plain and Reinforced Unit Masonry* 测量新拌混凝土的静态屈服应力.将 3DPC 混合料拌和均匀后分成 2 组:一组在搅拌机中持续搅拌,以模拟材料在打印仓中搅拌;另一组静置.在测量时将混合料倒入模具中,落锥(质量  $m$ ,锥角  $\theta$ )从指定高度以自由落体方式落入混合料中,测量落锥的穿透深度( $h$ ).按式(1)计算静态屈服强度  $\tau_0$ <sup>[19]</sup>,结果如图 2 中所示.由图 2 可见,3DPC 混合料的静态屈服强度随着静置时间的延长而增大,而持续搅拌的混合料静态屈服强度则随时间延长而降低.根据图 2 得出,试件制备应在 3DPC 混合料拌和均匀后的前 10 min 内完成.

$$\tau_0 = \frac{mg \cos^2 \theta}{\pi h^2 \tan \theta} \quad (1)$$

### 2.2 原位涂层材料

原位涂层技术所需涂层材料需要具备较高的流动性,以渗入狭窄的预留涂层空间.因此,本文选定了 2 种商用水泥基材料作为原位涂层材料:自密实砂

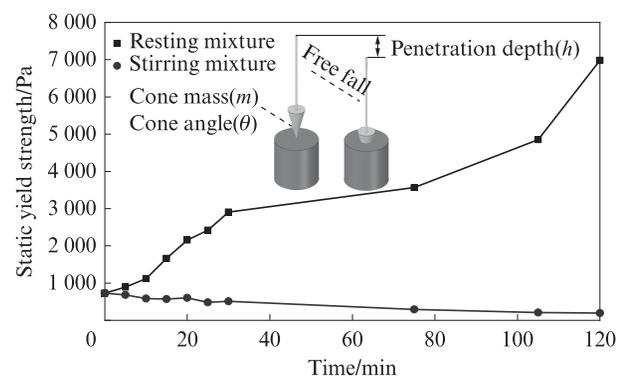


图 2 新拌 3DPC 的静态屈服应力

Fig. 2 Static yield strength of fresh 3D printed concrete

浆 SCC(型号 CGM-300)与超细灌浆水泥 GRC(型号 CGM-800),均购自北京中德新亚建筑材料有限公司.SCC 具有高强度、高流动度、自密实的优良特点.GRC 主要用于混凝土结构裂缝修复,其流动性高,可进行压力注射使之渗入不同宽度的裂缝中.两者流动性均较高,无需振捣即可实现自密实.两者的力学性能与流动性能详见表 2.

表 2 原位涂层材料的性能参数  
Table 2 Properties of in-situ coating materials

Material	Maximum particle size	Water-cement ratio (by mass)	Fluidity at 30 min/mm	Viscosity/ ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	Initial setting time/min	Vertical shrinkage ratio at 24 h/%	28 d strength/MPa		
							Compressive	Tensile	Flexural
SCC	1.0 mm	9:1	268	9 922	45	0.04	68.8	4.3	7.5
GRC	5 $\mu\text{m}$	8:2	223	6 374	25	0.20	52.2	2.0	4.2

### 2.3 试验过程

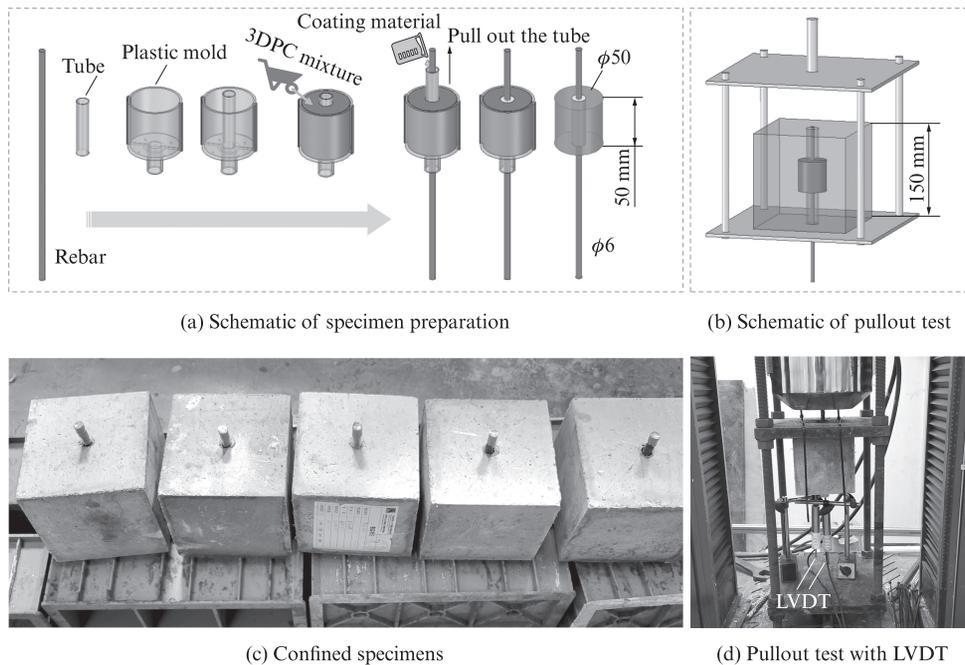
为研究原位涂层技术制备的加筋 3DPC 的握裹

力,去除 3D 打印过程产生的层间弱黏结的影响,本文使用定制模具保障通心管、钢筋与外围的模具轴

心相同.具体试件制备过程如图3(a)所示.首先在通心管外围浇入3DPC混合物;接着在通心管内部穿入钢筋,并倒入混合好的涂层材料;然后拔出通心管,再补充部分涂层材料将空隙全部填满.24 h后拆模,并使用自密实混凝土材料(购自北京中德新亚建筑材料有限公司,28 d抗压强度45.6 MPa)将所得试件进行封固,得到边长150 mm的立方体测试件,见图3(b)、(c).

通心管外径即为原位涂层的外直径,分别为16、18、20 mm,钢筋直径为6 mm,因此涂层厚度分别为

5、6、7 mm.根据通心管外径将使用SCC、GRC制备的试件分别记作SCC $\Phi$ 16、SCC $\Phi$ 18、SCC $\Phi$ 20和GRC $\Phi$ 16、GRC $\Phi$ 18、GRC $\Phi$ 20.同时也制备了2组对照试件:一组不使用涂层,先将钢筋放入,然后再浇入混凝土,并进行振动密实操作,试件记作PC-CAST;另一组先将混凝土浇入,再模拟常规的3D打印过程插入钢筋,不进行振动密实操作,试件记作PC-DRIN.每组制备3个试件.所有试件经标准养护28 d后,进行图3(b)所示的拉拔试验.通过位移计(LVDT)监测实际的钢筋位移,如图3(d)所示.



(a) Schematic of specimen preparation

(b) Schematic of pullout test

(c) Confined specimens

(d) Pullout test with LVDT

图3 试件制备及测试过程

Fig. 3 Preparation and pullout test of specimens

### 3 结果及讨论

各试件的拉拔曲线如图4所示.由图4可见,使用了原位涂层的钢筋3DPC试件的最大拉拔力在整体上均得到了显著的提升,说明原位涂层技术是一种有效的钢筋/混凝土黏结增强方式.

PC-CAST试件拉拔曲线为浇制混凝土中钢筋的拉拔曲线,与常规钢筋混凝土拉拔曲线较为一致.但相应的拉拔强度(26.88 MPa)小于常规浇制混凝土.究其原因:一是本文所用钢筋直径为6 mm,小于常规测试中所用钢筋直径(12、16 mm);二是3DPC抗压强度仅有21.60 MPa,低于常规混凝土的抗压强度.

如PC-DRIN试件拉拔曲线所示,直插加强筋试件的拉拔力大幅降低,计算所得最大拉拔强度为10.90 MPa,与PC-CAST试件相比,降低了59.4%,这主要是由于钢筋直接插入混凝土的过程中引入了

大量的空隙<sup>[14]</sup>,导致混凝土对钢筋的握裹力降低.这些插入空隙也会导致钢筋表面受到锈蚀,如图5(a)所示.

而对于使用SCC或GRC原位涂层的试件,由于涂层材料流动性较高(见表2),可以有效地渗透进入通心管预留的空隙,从而填充钢筋与混凝土之间的空隙,并与3DPC同时水化.将样品打磨后使用显微镜(基恩士VR-5000)观察界面形貌,如图5(b)、(c)所示,可见钢筋与混凝土界面非常密实.其钢筋表面也未发现明显锈蚀.另外,由于涂层材料与3DPC属于相同材料但不同配比,两者接触时间在拌和后的10 min内,可以共同水化凝固,因此两者之间存在较好的黏结.

由于GRC的24 h竖向膨胀率(0.20%,见表2)高于SCC及3DPC,导致GRC与3DPC在水化凝固过程中形变不一致,产生了裂缝,如图5(d)所示.裂缝沿着界面与径向开展,最大裂缝宽度可达8  $\mu$ m.这些

裂缝也会导致握裹力降低.而在本文中,当涂层材料GRC水化凝固时,外层的3DPC仍处于水化过程中,强度较低,容易被内层具有早强速凝特性(初凝时间

25 min)的GRC撑开,形成裂缝.因此,需要开展进一步研究,以延长涂层材料的凝结时间,适配收缩系数,使之与3DPC相协同.

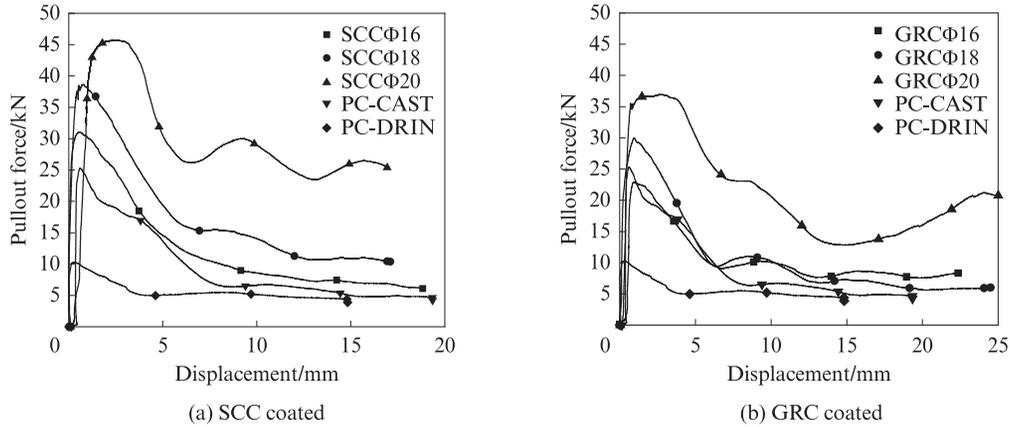


图4 各试件的拉拔曲线  
Fig. 4 Pullout curves of specimens

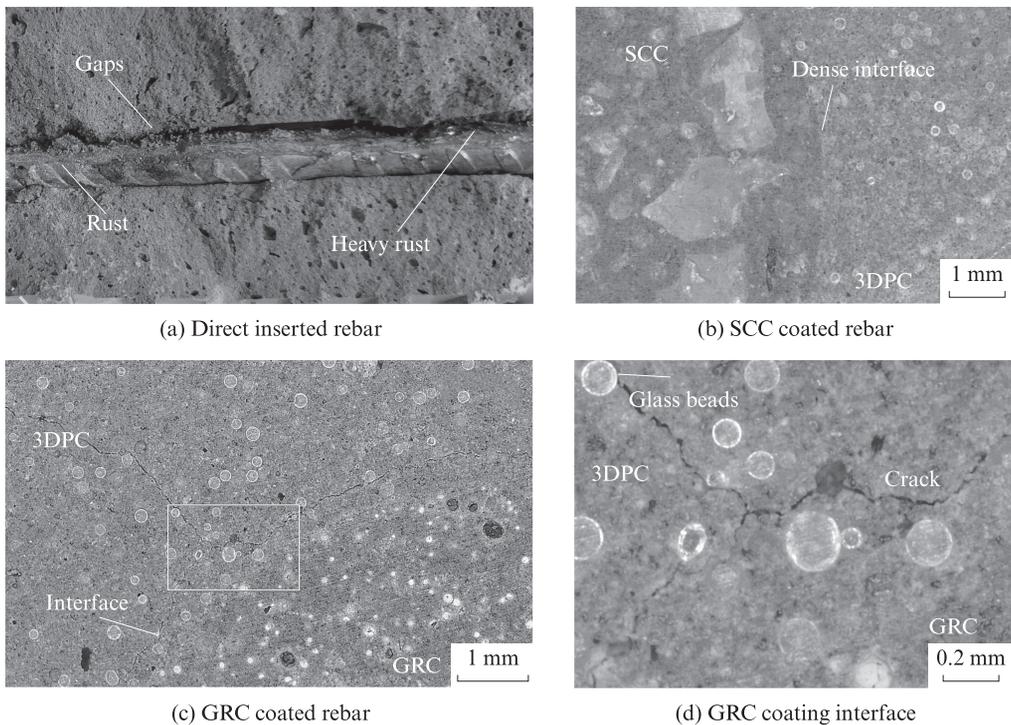


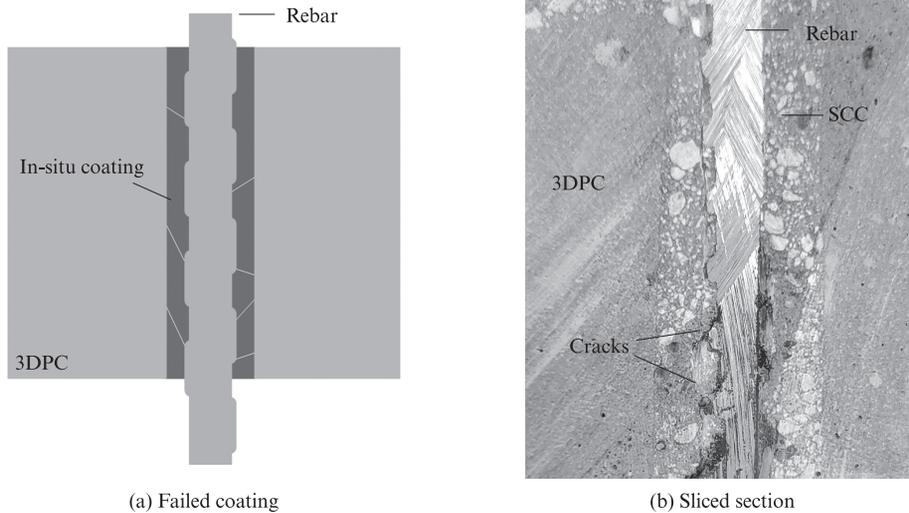
图5 加强筋、涂层与3DPC的界面形貌  
Fig. 5 Interfacial morphology of rebar, coating and 3DPC

传统应用中,钢筋涂层主要是为了保护钢筋防止锈蚀<sup>[23]</sup>.例如,预先在钢筋表面使用环氧材料涂敷一层厚约1 mm的涂层,待涂层固化后,再浇筑混凝土.虽然这种情况下混凝土对钢筋的握裹力受到了一定影响,但是由于钢筋的外形没有太大变化,混凝土对钢筋的握裹力仍以机械锚固力为主.也有研究使用玄武岩纤维增强聚合物的预涂层<sup>[24]</sup>,将钢筋复合成一个圆柱形棒体,其拉拔曲线产生了一些起伏,与本文中的原位涂层钢筋3DPC的拉拔曲线相似.原

位涂层后钢筋混凝土拉拔曲线(图4)符合四段式的黏结滑移曲线,即:黏结应力段、上升段、失效段、最终段.这主要是由于涂层材料与混凝土材料同属于无机胶凝材料,两者几乎同时水化固化形成一体,特性也较为一致.但在拉拔力达到最大值之后,黏结失效,拉拔力出现起伏式下降,尤其在试件 SCCΦ20、GRCΦ16、GRCΦ18、GRCΦ20的拉拔曲线中观察到较为明显的起伏.这主要是因为涂层材料在钢筋外围破裂,如图6(a)所示.形成的碎片在钢筋拔出通道

中与钢筋的肋条产生了断续式的锚固作用.使用切割机沿钢筋轴线将试件切开,可观察到破碎的涂层,如图6(b)所示.

综上,钢筋的拉拔破坏过程取决于钢筋、涂层、混凝土3种材料的力学特性及相互黏结关系,需要进一步的研究来揭示三者之间的具体规律.



(a) Failed coating

(b) Sliced section

图6 试件剖面示意及照片

Fig.6 Section diagram and photo

将最大拉拔力换算为拉拔强度,如图7所示.由图7可见:各原位涂层钢筋的拉拔强度均显著提升,从常规插入钢筋试件PC-DRIN的10.90 MPa到最高拉拔强度48.50 MPa(试件SCCΦ20),提高了345.0%;原位涂层钢筋的拉拔强度平均值为36.95 MPa,比试件PC-DRIN提升了239.0%;除GRCΦ16外,原位涂层钢筋试件的拉拔强度均超过了拉拔常规浇筑钢筋混凝土试件PC-CAST.这主要是由于本文中使用的3DPC力学性能较低,且3DPC为适配可建造性,具有非常低的流动性,导致其工作性也较差;而SCC及GRC都具有较高的力学性能及流动性,可以充分包裹钢筋.由图7还可见,随着涂层的加厚,试件拉拔强度增大.这主要是

由于3DPC的抗压强度低于SCC及GRC.可预期,当涂层外径继续变大为无穷大时,即为自密实砂浆(或超细灌浆水泥)材料中的钢筋握裹力的情况,具体的力学性能取决于这2种涂层材料的厚度.

3DPC与涂层材料之间的黏结类似于新旧混凝土之间的黏结,但又有所不同.在执行涂层操作时,3DPC尚未达到初凝,与涂层材料之间有较为有效的黏结,可视作2种混凝土材料的同时浇筑黏结.从理论上讲,原位涂层的操作时间越快越好.但其中的操作因素(如插入通心管、灌入涂层材料、拔出通心管等)均会影响两者的黏结效果.因此,有必要开展更深入的研究,并开发自动化的工艺技术.

由于环氧树脂的黏度(10~100 mPa·s)远低于SCC或GRC,因此环氧树脂的涂层操作更为顺利.而在使用SCC或GRC填充钢筋与通心管之间的空隙时,需要对钢筋进行振动或者旋转,以促进涂层材料的渗入.另外,SCC及GRC材料中存在大颗粒(SCC中存在细砂,GRC中存在水泥颗粒),在振动过程中容易发生离析,导致材料不均匀.因此,需要进一步研究更加适用的涂层材料.

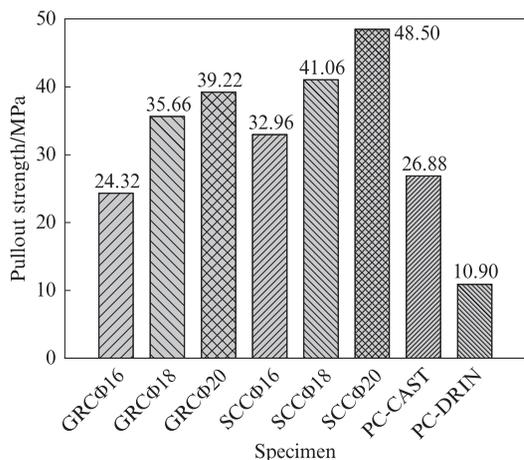


图7 各试件拉拔强度

Fig.7 Pullout strength of specimens

#### 4 结论

(1)原位涂层技术既解决了直接插入钢筋给3D打印混凝土3DPC带来的空隙问题,又保护了钢筋,减少了锈蚀的产生.3DPC、涂层、钢筋之间具备密实的黏结界面.

(2)原位涂层技术有效提升了3DPC对钢筋的握

裹力.拉拔强度提升幅度最大为345.0%,平均为239.0%.由于涂层的力学性能及流动性优于3DPC,因此所得原位涂层钢筋试件的拉拔强度大多超过了使用3DPC浇制的钢筋混凝土.

(3)原位涂层钢筋3DPC拉拔曲线呈四段式.涂层破裂后,对钢筋拔出产生了断续式的锚固作用,因此得到了起伏的拉拔曲线.

(4)后续仍需进一步开展对原位涂层材料的研发,解决涂层材料与3DPC的收缩一致性问题.另外,研制相关的机电自动涂层设备可有效提高涂层效率,提升涂层质量,有望解决3D打印混凝土技术的关键问题.

#### 参考文献:

- [1] BESTER F, VAN DEN HEEVER M, KRUGER J, et al. Reinforcing digitally fabricated concrete: A systems approach review[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 37:101737.
- [2] 侯少丹, 肖建庄, 段珍华. 3D打印细石混凝土调配及其可打印性和力学性能[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(7):730-736.  
HOU Shaodan, XIAO Jianzhuang, DUAN Zhenhua. Preparation of 3D printable concrete with small coarse aggregate and its printability and mechanical properties[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(7):730-736. (in Chinese)
- [3] 刘天浩, 王里, 李之建, 等. 混凝土3D打印加筋增韧方法研究进展[J]. *工业建筑*, 2021, 51(6):9-15.  
LIU Tianhao, WANG Li, LI Zhijian, et al. A review of incorporating reinforcement method in 3D concrete printing[J]. *Industrial Construction*, 2021, 51(6):9-15. (in Chinese)
- [4] KEITA E, BESSAIES-BEY H, ZUO W Q, et al. Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing: Measurement and physical origin[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 123:105787.
- [5] DIGGS-MCGEE B N, KREIGER E L, KREIGER M A, et al. Print time vs. elapsed time: A temporal analysis of a continuous printing operation for additive constructed concrete[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 28:205-214.
- [6] MARCHMENT T, SANJAYAN J, XIA M. Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification[J]. *Materials and Design*, 2019, 169:196-204.
- [7] HAMBACH M, VOLKMER D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 79:62-70.
- [8] BAZ B, AOUAD G, LEBLOND P, et al. Mechanical assessment of concrete—Steel bonding in 3D printed elements[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 256:119457.
- [9] BAZ B, AOUAD G, REMOND S. Effect of the printing method and mortar's workability on pull-out strength of 3D printed elements[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 230:121-128.
- [10] MATTHAUS C, KOFLER N, KRANKEL T, et al. Interlayer reinforcement combined with fiber reinforcement for extruded lightweight mortar elements[J]. *Materials*, 2020, 13(21):4778.
- [11] BESTER F, VAN DEN HEEVER M, KRUGER J, et al. Steel fiber links in 3D printed concrete [C]//Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. [S. l.]:Springer Cham., 2020, 28:398-406.
- [12] PERROT A, JACQUET Y, RANGEARD D, et al. Nailing of layers: A promising way to reinforce concrete 3D printing structures[J]. *Materials*, 2020, 13(7):1518.
- [13] CAO X P, YU S H, ZHENG D P, et al. Nail planting to enhance the interface bonding strength in 3D printed concrete [J]. *Automation in Construction*, 2022, 141:104392.
- [14] MARCHMENT T, SANJAYAN J. Bond properties of reinforcing bar penetrations in 3D concrete printing [J]. *Automation in Construction*, 2020, 120:103394.
- [15] MARCHMENT T, SANJAYAN J. Reinforcement method for 3D concrete printing using paste-coated bar penetrations [J]. *Automation in Construction*, 2021, 127:103694.
- [16] HOSSEINI E, ZAKERTABRIZI M, KORAYEM A H, et al. A novel method to enhance the interlayer bonding of 3D printing concrete: An experimental and computational investigation[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 99:112-119.
- [17] HOSSEINI E, ZAKERTABRIZI M, HABIBNEJAD KORAYEM A, et al. Orbital overlapping through induction bonding overcomes the intrinsic delamination of 3D-printed cementitious binders [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(8):9466-9477.
- [18] ZHANG Y, ZHANG Y S, YANG L, et al. Hardened properties and durability of large-scale 3D printed cement-based materials [J]. *Materials and Structures*, 2021, 54(1):45.
- [19] BAZ B, AOUAD G, KLEIB J, et al. Durability assessment and microstructural analysis of 3D printed concrete exposed to sulfuric acid environments [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 290:367-386.
- [20] SUN X Y, ZHOU J W, WANG Q, et al. PVA fibre reinforced high-strength cementitious composite for 3D printing: Mechanical properties and durability[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 49:102500.
- [21] CAO X P, YU S H, CUI H Z, et al. In-situ coating technique for rebar installation for 3D-printed reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 397:132310.
- [22] CHEN Y, CHAVES FIGUEIREDO S, LI Z, et al. Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture[J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 132:106040.
- [23] 朱艳梅, 张翼, 蒋正武. 羟丙基甲基纤维素对3D打印砂浆性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(6):1123-1130.  
ZHU Yanmei, ZHANG Yi, JIANG Zhengwu. Effect of hydroxypropyl methylcellulose ether on properties of 3D printing mortar [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(6):1123-1130. (in Chinese).
- [24] MA G W, HUANG Y M, ASLANI F, et al. Tensile and bonding behaviours of hybridized BFRP-steel bars as concrete reinforcement[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 201:62-71.