

聚合物纤维增强 3D 打印混凝土材料研究进展

吕 春^{1*}, 刘 杰²

(1. 齐齐哈尔大学建筑与土木工程学院, 齐齐哈尔 161006;
2. 齐齐哈尔大学轻工与纺织学院, 齐齐哈尔 161006)

摘要: 聚合物纤维以其优异的性能已被广泛应用于混凝土技术领域。在 3D 打印混凝土材料中采用聚合物纤维取代钢纤维、碳纤维等传统纤维是降低成本、改善材料性能的重要途径。从影响 3D 打印混凝土材料性能角度出发, 对掺加聚合物纤维 3D 打印混凝土材料的性能和研究现状进行综述; 主要从聚乙烯(PE)纤维、聚丙烯(PP)纤维、聚乙烯醇(PVA)纤维等聚合物纤维出发, 对 3D 打印混凝土材料的工作性能、力学性能和耐久性能等影响研究现状进行了总结, 同时也对混凝土层间结合强度和各向异性进行了总结分析。提出聚合物纤维增强 3D 打印混凝土材料存在的问题, 并对聚合物纤维在 3D 打印混凝土材料中的应用前景进行了展望。

关键词: 3D 打印混凝土; 聚合物纤维; 工作性能; 力学性能; 耐久性能; 层间结合强度

3D 打印技术是一种基于“增材制造”的快速成型技术, 其核心原理是分层累加制造, 包括挤出堆积式、粉末式和滑模等施工工艺^[1]。当今建筑领域 3D 打印技术主要采用 D-shape 工艺和轮廓成型 (Contour Crafting)^[2,3]。D-Shape 工艺是一种粉末式施工工艺^[4], 轮廓成型属于挤出堆积式工艺^[5]。为了提高 3D 打印混凝土结构的承载力和稳定性, 通常挤出堆积式工艺采用由内波纹层支撑的空腔结构和交叉打印细丝的纹理结构等几何结构形式, 如图 1 所示。

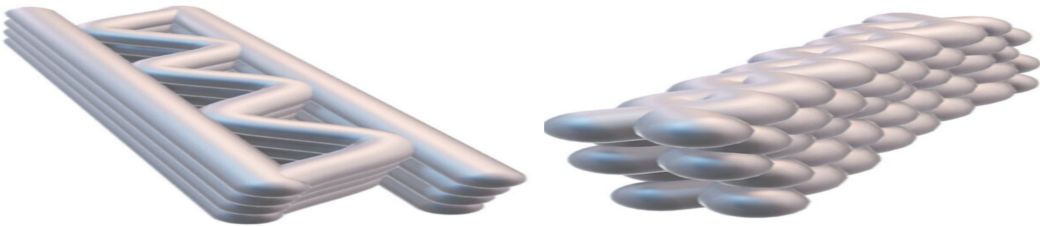


图 1 挤出堆积式工艺的几何结构形式(2020 Elsevier 版权许可)^[6]
Figure 1 The geometric structure of the extrusion stacking process
(Reprinted with permission from Ref. [6]; Copyright 2020 Elsevier)

3D 打印混凝土技术无需模板, 具有工艺精细和成型迅速等优点, 其材料性能包括工作性能、力学性能和耐久性能等^[7]。混凝土拌合物应保证连续均匀的可挤出性^[8], 以及层间粘聚性和凝结时间, 以满足自由成型的可建造性能^[9~11]。由于工艺原因^[12], 一般无法设置受力钢筋, 常用的方法是掺加纤维材料, 以增强混凝土的结构强度、韧性和抗冲击性能。

3D 打印混凝土内掺加的传统纤维材料包括钢纤维、碳纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维等。钢纤维能有效提高混凝土拉伸弯曲能力, 具有耐冲击抗疲劳性能, 缺点是容易锈蚀, 价格相对较高^[13]; 碳纤维具有轻质高强的特性, 其耐高温难腐蚀, 抗疲劳能力较强, 但韧性较差, 抗冲击能力不足; 玻璃纤维具有很好的耐

10. 14028/j. cnki. 1003-3726. 2022. 07. 005
收稿: 2021-04-07; 修回: 2021-09-30;
基金项目: 黑龙江省省属高校基本科研业务费面上项目(145109126), 教育部产学研协同育人项目(201802142010), 黑龙江省高等教育教学改革项目(SJGY20200784);
作者简介: 刘杰(1968-), 女, 副教授, 主要从事纤维素纤维及聚合物纤维复合材料研究。E-mail: liujie0452@126. com;
* 通讯联系人: 吕春, 教授, 从事纤维增强混凝土复合材料研究。E-mail: lvc@qqhru. edu. cn.

腐蚀性,同时具有耐热绝缘性能,但其耐碱和耐磨性能较差^[14,15]。传统纤维材料能降低 3D 打印混凝土的脆性破坏,但在混凝土受拉时会出现应变软化现象^[16]。用有机合成聚合物纤维取代传统纤维,可以有效降低成本、改善 3D 打印混凝土性能^[17]。聚合物纤维是一种人工合成单丝束状高强纤维,加入 3D 打印混凝土中可有效控制裂缝的形成及发展,提高其抗冲击能力和抗渗性能。常用的外掺聚合物纤维包括聚乙烯(PE)纤维^[18]、聚丙烯(PP)纤维^[19]、聚乙烯醇(PVA)纤维^[20]、聚丙烯腈(PAN)纤维、芳纶(AR)纤维等。

1 聚合物纤维的性能与掺量

聚合物纤维的力学性能、几何特征、伸长率等均可影响 3D 打印混凝土性能。常用聚合物纤维的典型性能见表 1。可以看出,聚乙烯醇纤维和芳纶纤维属于高弹性模量纤维,不仅具有与钢纤维类似的力学性能,还具有优异的耐疲劳和抗冲击性能。其余聚合物纤维弹性模量较低,该类聚合物纤维主要提高 3D 打印混凝土材料的韧性和抗冲击等性能。

表 1 聚合物纤维的典型性能^[21]
Table 1 Typical properties of polymer fibers^[21]

纤维类型	直径(μm)	密度(g/cm ³)	抗拉强度(MPa)	杨氏模量(GPa)	断裂伸长率(%)
聚乙烯纤维(PE)	7~150	0.96	200~300	5~6	3~4
聚丙烯纤维(PP)	20~70	0.91	300~700	3.5~11	15~25
聚乙烯醇纤维(PVA)	1.30	1.30	600~2500	5~50	6~17
聚丙烯腈纤维(PAN)	5~17	1.18	800~950	16~32	9~11
芳纶纤维(AR)	10~12	1.442	500~3100	60~120	2.1~4.5

3D 打印混凝土拌合物包括胶凝材料、集料、外加剂,也包括粉煤灰、硅粉等掺合料及适宜的水胶比。为改善混凝土性能,也需添加纤维等功能材料。由于纤维类型及掺量,纤维长度及长径比均可影响混凝土性能,故选取不同的纤维,混凝土性能会存在显著差异。这一方面与纤维自身性能密切相关;另一方面,纤维与基体界面粘结特性各异也会对混凝土宏观力学性能产生影响。表 2 为相关研究^[10,22~26,32]采用的聚合物纤维类型和混凝土拌合物材料组成,集料按胶凝材料质量百分比掺入,纤维为体积掺量。

表 2 纤维类型和拌合物材料组成
Table 2 Fiber type and composition of the mixture

纤维类型	长度(mm)	长径比	体积掺量(%)	胶凝材料	集料(%)	水胶比(ω/c)	文献
聚乙烯纤维(PE)	12.00	480	1.00~2.00	硅酸盐水泥	92.07	0.27	[25]
	3.00~9.00	30~129	1.00		100.00	0.20	[24]
聚丙烯纤维(PP)	12.00	667	1.20	硅酸盐水泥	150.00	0.26~0.44	[10]
	6.00	500	0.25	地质聚合物	108.70	—	[23]
	11.20	1867	0.25~1.00		102.25	—	[22]
	9.00	290	0.8~1.6	硅酸盐水泥	67.00	0.30	[26]
	12.00	480	0.30		111.12	0.38	[32]
聚乙烯醇纤维(PVA)	26.00	2167	0.25	地质聚合物	108.70	—	[23]

可以看出,3D 打印混凝土拌合物内,聚合物纤维体积掺量多为 0.25%~1.0%,一般不大于 2.0%,长径比均大于 30。拌合物中添加了各类改善其性能的外加剂及粉煤灰、硅粉等掺合料。集料添加量与胶凝材料大体相等,水胶比控制在较低水平。

当前,针对聚合物纤维影响研究主要集中于聚乙烯纤维,聚丙烯纤维,聚乙烯醇纤维等类型。下面分别从不同类型的聚合物纤维对 3D 打印混凝土材料工作性能、力学性能及耐久性能影响进行总结,同时对混凝土层间结合强度和各向异性进行分析。

2 纤维对混凝土工作性能的影响

混凝土工作性能主要是指和易性,是混凝土拌合物最重要的性能,包括流动性、粘聚性和保水性。由于 3D 打印混凝土特殊工艺要求,除保证和易性外,还需控制其凝结时间和触变性。选择适宜的胶凝材料、集料、外加剂及其他材料,掺加纤维材料可以约束结构变形,防止混凝土剥落,得到均匀连续的打印效果。打印混凝土时,纤维掺量对打印头堵塞的敏感性有一定影响,与钢纤维相比,柔性聚合物纤维影响较小。

2.1 聚乙烯纤维的影响

当前针对聚合物纤维对混凝土工作性能的影响研究大多以试验测试为基础。聚乙烯纤维强度较高,密度低,是一种坚固的轻量级热塑性聚合材料。Ye 等^[25]对 3D 打印混凝土在不同聚乙烯纤维掺量下的流动性影响进行了研究。混凝土的扩展直径和渗透深度的结果如图 2 所示。很明显,扩展直径和渗透深度都随纤维掺量的增加而降低,流动性变差。聚乙烯纤维掺量 2.0%的混凝土扩展直径为 144mm,与纤维掺量 1.5%和 1.0%的打印混凝土相比,分别减小了 11.1%和 14.8%;同样,聚乙烯纤维掺量 2.0%的混凝土穿透深度则分别提高了 5.0%和 11.6%^[25]。相关试验表明^[24],与钢纤维不同,掺加聚乙烯等聚合物纤维的混凝土流动性变差,但避免了钢纤维混凝土加载后期突然断裂的现象,聚合物纤维的应用性能高于钢纤维混凝土。

2.2 聚丙烯纤维的影响

在 3D 打印混凝土拌合物内掺加的聚合物纤维中,聚丙烯纤维最为常见。研究表明^[10,22,23,26],与聚乙烯纤维类似,聚丙烯纤维使混凝土流动性变差。Malaszkiewicz 等^[27]选择长度 12~50mm,体积分数 0~4%的纤维进行混凝土流动性试验发现,聚丙烯纤维可使混凝土流动性损失放缓。Nematollahi 等^[23]通过 0.25%~1.0%掺量的聚丙烯纤维来调整混凝土工作性能,所有拌合物均表现出合理的加工性和挤出性能。当打印混凝土拌合物的剪切强度控制在 0.55kPa 时,每打印组只有一根打印丝塌陷,达到最佳效果,如图 3 所示。

2.3 聚乙烯醇纤维的影响

前述试验显示,随着纤维掺量增加,混凝土流动性下降。相关研究表明,打印混凝土流动度应控制在

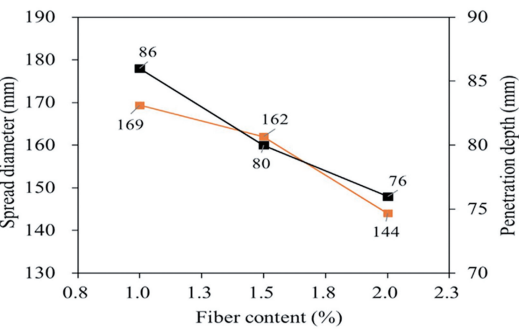


图 2 聚乙烯纤维流动性测试结果
(2021 Elsevier 版权许可)^[25]
Figure 2 Results of flowability tests (Reprinted with permission from Ref. [25]; Copyright 2021 Elsevier)

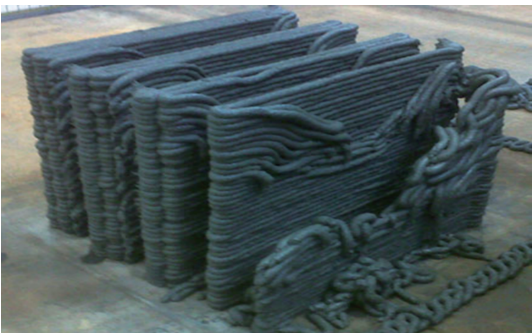


图 3 0.55kPa 剪切强度混凝土的工作性能
(2012 Springer Nature 版权许可)^[10]
Figure 3 The buildability of concrete mixture (Reprinted with permission from Ref. [10]; Copyright 2012 Springer Nature)

170~180mm, 1.0%~1.4%的聚乙烯醇纤维掺量比较符合这一范围^[28]。汪群等^[26]将长 9mm, 直径 31 μ m 的聚乙烯醇纤维掺入到 3D 打印混凝土内, 试验结果表明其流动性下降明显。

凝结时间是 3D 打印混凝土工作性能的一项重要指标。聚乙烯醇纤维掺量对混凝土凝结时间并没有明显影响, 在聚乙烯纤维和聚丙烯纤维的研究中也有类似的结论^[25,30]。在相同缓凝剂掺量的前提下, 随着聚乙烯醇纤维掺量的增加, 混凝土凝结时间影响范围始终保持在 6min 以内^[29]。当然, 可以利用胶凝材料及外加剂等调整混凝土的凝结时间。Le 等^[30]研制的混凝土材料具有 10min 以上的凝结时间, 最长达到 100min, 均具有较好的混凝土打印质量。

触变性能是保证 3D 打印混凝土实现结构竖向堆积并快速成型的关键。通常利用流变仪进行 3D 打印混凝土的触变性能测试。触变性能指标达到 10000N·mm·rpm 时^[11], 混凝土材料能更好地打印输出。试验表明掺加聚合物纤维可以有效提高 3D 打印混凝土材料的触变性能。

实际上, 与纤维的掺量、长度及长径比等对混凝土拌合物工作性能影响相比较, 聚合物纤维的类型对拌合物的影响程度较弱。掺入不同类型的聚合物纤维使拌合物流动性均有所下降, 也使混凝土拌合物具有更好的可建造性。

3 纤维对混凝土力学性能的影响

混凝土力学性能主要包括抗压、抗拉、抗弯、抗折、抗剪等强度指标, 也包括相邻混凝土打印层之间的界面结合强度, 以及由于不同打印层及纤维在混凝土中不同取向所产生的各向异性影响。

3.1 单一聚合物纤维影响

在 3D 打印混凝土材料的力学性能研究中, 有大量关于聚乙烯纤维^[24,25,31]、聚丙烯纤维^[10,22,23,24]、聚乙烯醇纤维^[11,24,26,32]等单一聚合物纤维的影响研究。

利用聚乙烯纤维增强 3D 打印混凝土技术已在工程应用领域进行了探索。徐卫国等^[31]采用 3D 打印混凝土材料建成了长 26.3m、宽 3.6m 的单拱结构步行桥, 采用聚乙烯纤维作为增强材料, 抗压强度达到 65MPa, 抗折强度达到 15.6MPa, 其力学性能达到工程应用要求。Ye 等^[25]采用聚乙烯纤维进行的一系列试验显示, 纤维掺量为 1.5%和 2.0%的混凝土, 其拉伸强度和应变能力略低于未掺加纤维的试样; 而掺量为 1.0%的混凝土则略高于未掺加纤维的试样。纤维掺量为 1.5%试样的抗弯强度, 变形能力和能量耗散能力均优于其他试样。

聚丙烯纤维与其他类型的纤维对比发现, 在加载达到峰值后, 均具有控制开裂和增加韧性的性能^[24]。Nematollahi 等^[22]研究了聚丙烯纤维对 3D 打印地质聚合物混凝土力学性能的影响。拌合物中加入 0.25%~1.00%体积掺量的聚丙烯纤维, 图 4 显示出在垂直打印方向上弯曲应力与中跨挠度的关系。不掺加纤维的拌合物(PP₀)表现出脆性破坏, 破裂后载荷降至 0。掺加纤维后破坏模式从脆性变为韧性, 其性能取决于纤维掺量。纤维掺量为 0.25%和 0.5%的混凝土表现出挠曲软化特性^[16], 而纤维掺量为 1.0%和 0.75%的混凝土则表现出挠曲硬化行为。

聚乙烯醇纤维同样可以有效改善 3D 打印混凝土的抗压强度。Paul 等^[11]利用聚乙烯醇纤维制备打印混凝土, 打印初期贯入强度 0.05MPa, 30min 后其贯入强度为 0.7MPa, 28 天抗压强度为 40MPa。汪群等^[26]对聚乙烯醇纤维进行抗压强度试验, 其 1 天龄期抗压强度可达到 28 天龄期抗压强度的 50%, 适合 3D 打印混凝土快速施工的要求。

图 5 为国内外相关文献聚合物纤维掺量与混凝土抗压强度关系汇总。可以看出不同类型的聚合物纤维对混凝土抗压强度的影响没有明显差别。纤维掺量多集中在 1%左右。由于纤维对混凝土基体的约束作用, 混凝土抗压强度随纤维掺量的增加而增大。江世永等^[33]对受压破坏后的混凝土试件进行 SEM 测试发现, 加载后聚乙烯醇纤维表面光滑, 没有明显的损伤, 如图 6(a)所示。图 6(b)看到加载后期混凝土裂缝增大, 聚乙烯醇纤维从混凝土中拔出明显, 其纤维表面形成微划痕。测试表明聚乙烯醇纤维

与混凝土之间的粘结性能良好,能够有效阻止混凝土微观裂缝的开展。

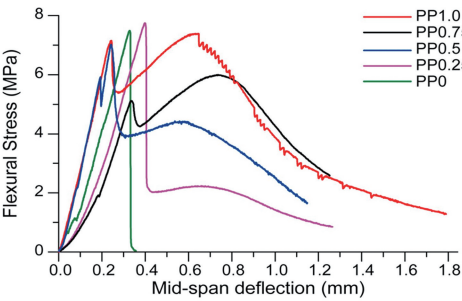


图 4 垂直方向上弯曲应力与中跨挠度曲线
(2018 MDPI 版权许可)^[22]

Figure 4 The flexural stress versus mid-span deflection
(Reprinted with permission from Ref.[22]; Copyright 2018 MDPI)

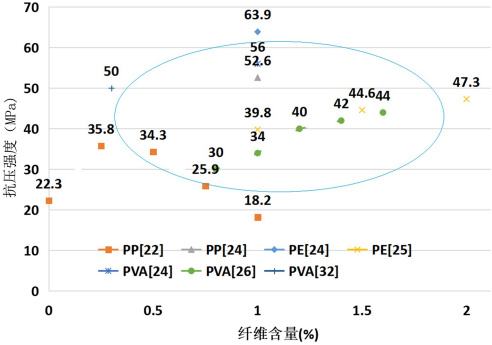


图 5 纤维掺量与抗压强度关系汇总

Figure 5 Summary of fiber content and
compressive strength

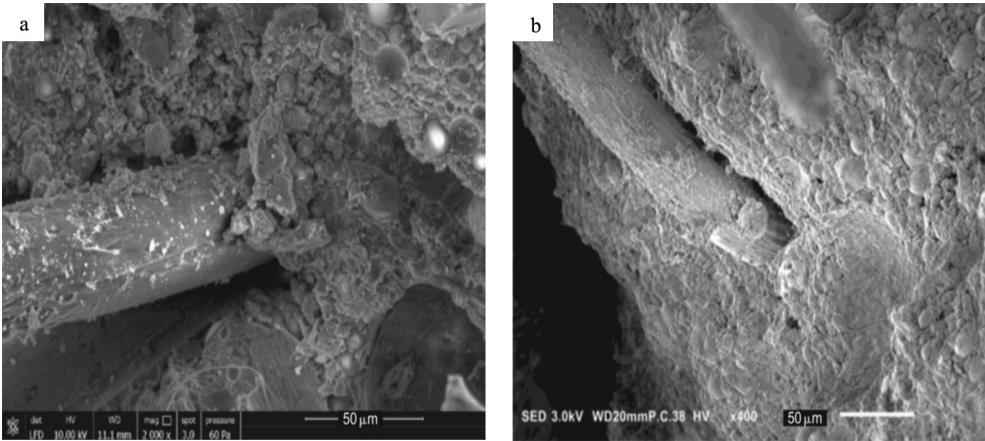


图 6 纤维与混凝土粘结的 SEM 照片(2017《材料导报》编辑部版权许可)^[33]

Figure 6 SEM images of fiber-concrete bonding (Reprinted with permission from Ref.[33];
Copyright 2017 Editorial Office of *Materials Reports*)

纤维在混凝土早期水化的过程中起到了有效的桥接作用,而这种桥接作用对提高混凝土抗折强度效果明显,同时纤维沿打印路径方向进行取向,进一步提高了混凝土的抗折强度。但是,微观结构分析也表明^[25],当纤维掺量增加到某一限定值时,纤维将产生扭曲取向。此时混凝土在拉应力下产生裂缝时,混凝土界面间应力不能直接传递给纤维,从而影响混凝土的抗折强度。

3.2 混杂纤维的影响

单一纤维增强混凝土材料具有各自的优势,同时又有不足之处,于是不少学者将两种以上具有不同性能和特点的纤维进行搭配和混合,以适应不同工程的需要。可以预见,多聚合物纤维混杂及聚合物纤维与传统纤维混杂掺入 3D 打印混凝土材料,能充分发挥纤维各自特性,进一步改善混凝土材料的力学性能。

不同纤维混杂是纤维增强 3D 打印混凝土性能应用的重要内容。对混杂纤维力学性能试验较多,但对纤维与基体界面的作用机理研究相对较少。Kamile 等^[34]对聚丙烯和聚乙烯醇混杂纤维混凝土进行了弯曲试验,研究了混杂纤维对混凝土力学性能的影响。结果表明,随着混杂纤维掺量比的提高,混凝土的塑性变形能力得到进一步改善,混凝土裂纹数目明显减少。文献^[11,30]等则分别选用聚丙烯纤维和耐碱性玻璃纤维来改善混凝土的表面抗裂性能。Lim 等^[35]将长钢丝与短聚乙烯醇纤维进行混杂,使得混凝土抗弯强度提高 290%;纤维掺量达到 1% 体积掺量时,混凝土抗拉强度和抗折强度明显提高。Le 等^[30]通过降低水胶比,优化材料级配的方法,抗压强度达到 57MPa,最高达到 100MPa,抗折强度达到 11MPa,

同时具有良好的工作性能。

混杂纤维是今后 3D 打印混凝土材料发展方向之一。利用聚合物纤维、传统纤维、天然植物纤维等不同种类纤维混杂使用,充分利用各自特性,实现改善混凝土性能的目的。

3.3 纤维对层间结合强度的影响

3D 打印混凝土打印层界面间结合强度的特性,是其与普通混凝土性能差异的主要因素。一方面,混凝土打印层存在宏观尺度的孔隙,层间结合能力较弱;另一方面,混凝土拌合物流动过程中,纤维有分离和漂浮的趋势,纤维沿平行于打印方向定向分布,拌合物挤出效果如图 7 所示。



图 7 拌合物从喷嘴中挤出效果(2018 MDPI 版权许可)^[23]

Figure 7 The mixture being extruded from the nozzle (Reprinted with permission from Ref. [23]; Copyright 2018 MDPI)

研究表明^[32,36,37],掺加纤维并不会明显提高混凝土打印层界面的拉伸和剪切强度,甚至有所减弱。其主要原因在于混凝土打印层界面间无纤维贯通,导致打印层界面间纤维没有发挥作用;另一方面,混凝土中掺入纤维后流动性降低,打印层界面之间粘结力相对减弱,进一步降低各打印层之间结合效果。图 8 显示了聚丙烯纤维为 0~1.0% 体积掺量时混凝土层间结合强度。0.25% 纤维掺量的混凝土层间结合强度最高,比不含纤维的混凝土高 19%。纤维掺量高于 0.25% 的混凝土层间结合强度均低于 PP₀ 和 PP_{0.25}^[23],进一步验证了纤维的掺量增加降低了层间结合强度。

混凝土层间打印时间间隔、打印机喷嘴高度和混凝土表面脱水情况等,对混凝土层间结合强度均会产生影响^[38,39]。由于分层打印,混凝土在空间不同方向存在很大的性能差异,具有明显的各向异性,即在某一方向的抗压强度和弹性模量均较低^[40~43]。各向异性使混凝土在抗压强度上比抗折强度更明显。图 9 为聚乙烯纤维掺量 1.0% 的打印混凝土的应力-应变曲线^[25],不同方向具有明显差异。加载试件沿 X 和 Y 方向曲线突然下降,这主要是由于相邻层之间的纤维桥接较弱;沿 Z 方向峰后曲线相对柔和,表现出更好的可变形性,这主要归因于加载方向避免了层间薄弱界面的影响。

针对混凝土层间结合强度薄弱问题,学者们提出了多种优化方法^[44~55]。制备混凝土时,掺入可以增强混凝土层间界面粘结性能的材料;也可以在混凝土层间增加一层与混凝土材料有良好粘结强度的材料,或者通过使用一些纳米材料改善纤维与混凝土基体的粘结性能。除此以外,还可以通过对聚合物纤维化学改性,合理利用纤维的特性,改善施工工艺条件和增加打印设备性能,使纤维穿透混凝土层间界面,参与混凝土层间结合受力。

4 纤维对混凝土材料耐久性能的影响

混凝土的耐久性对水泥基体结构的长期服役寿命具有重要影响。通过研究聚合物纤维在混凝土中的作用机理试验发现,混凝土开裂初期,纤维的桥接作用在混凝土裂缝内部限制了基体开裂进程,在一定程度上抑制裂缝进一步发展,从而提升了纤维混凝土的耐久性。

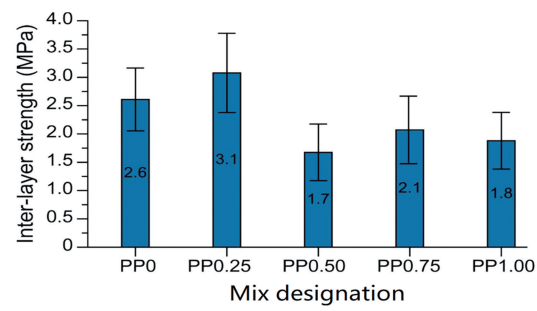


图 8 打印层间粘合强度(2018 Trans Tech Publications Ltd. 版权许可)^[23]

Figure 8 The interlayer bond strength (Reprinted with permission from Ref. [23]; Copyright 2018 Trans Tech Publications Ltd.)

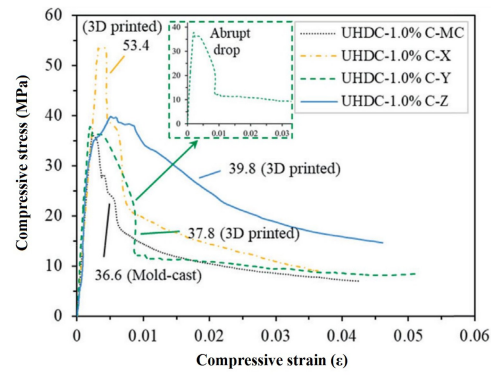


图 9 混凝土试件平均压应力-应变曲线 (2021 Elsevier 版权许可)^[25]

Figure 9 Average compressive stress-strain curves (Reprinted with permission from Ref. [25]; Copyright 2021 Elsevier)

纤维增强混凝土耐久性主要表现在疲劳变形性能、抗裂防渗、抗冻性能和抗腐蚀性能等方面。聚合物纤维分子链上无极性基团,是一种憎水材料,在混凝土拌合物中分散性差,基体界面粘接性能较弱。纤维种类不仅会影响材料的结构行为,也会影响材料的耐久性^[56]。当聚合物纤维掺量过多时,会降低混凝土的抗渗性能,同时,由于裂缝出现,其抗碳化能力和抗冻融能力都会降低。纤维的长径比对混凝土的开裂影响较大,较高的长径比通常会有较高的开裂强度^[57]。

Zhang 等^[58]对其研发的 3D 打印混凝土材料进行耐久性能试验。结果表明,选择品种适合的胶凝材料,添加适当的外加剂和掺合料,选择合理的水灰比和砂的颗粒级配,合适的纤维品种和掺量等,可以有效减少 3D 打印混凝土微裂缝,有效提高混凝土的抗渗、抗冻融、抗碳化、耐腐蚀等耐久性能。

事实上,与聚合物纤维对混凝土工作性能和力学性能影响研究相比,对聚合物纤维增强 3D 打印混凝土耐久性研究相对较少。这是因为 3D 打印混凝土技术近年刚刚发展起来,工程实践中尚缺乏相关案例,基于自然环境下工程应用时间较短,需通过长期试验研究和工程应用,积累 3D 打印混凝土耐久性相关经验数据及对相关理论的实践验证。

5 结论与展望

聚合物纤维虽然降低了混凝土拌合物的流动性,但也使其具有良好的可建造性,同时混凝土抗折性能和韧性明显增强,在 3D 打印混凝土领域具有独特优势和发展前景。

(1)采用人工合成聚合物纤维以及部分天然纤维混杂替代传统纤维^[59],可以降低成本,改善 3D 打印混凝土性能;混杂纤维能提高混凝土抗压、抗折和劈裂强度,显著增强混凝土的抗裂性能和韧性;结合各类纤维特性,利用长短结合、刚柔搭配的原则,积极推广使用混杂纤维;利用聚合物纤维质地柔软、钢纤维较硬的特性,进行混杂添加,采用合理的纤维级配形成完整的纤维网;

(2)结合 3D 打印混凝土的各向异性影响机理,通过调整打印方向、纤维品种和掺量等,可使混凝土各向异性与建筑物受力情况一致;同时,为改善打印层之间的空隙对混凝土强度和耐久性的影响,通过合理利用纤维的特性,改善工艺条件和打印设备性能,使纤维穿透混凝土层间界面,参与混凝土层间结合受力,增强层间混凝土的粘结,提升混凝土打印材料的性能;

(3)通过对聚合物纤维进行表面改性,以改善纤维增强材料的性能;利用聚合物纤维的柔韧性和纳米材料大比表面积,在混凝土内部形成多尺度宏观和微观纤维,可提高 3D 打印混凝土性能。

参考文献：

[1] Paul S C,Zijl G,Tan M J,Gibson I. Rapid Prototyping J,2018,24(4):784~798.

[2] Xu J,Ding L,Cai L,Zhang L,Luo H,Qin W. Automat Constr,2019,104:95~106.

[3] 梁晓静,于晓燕. 高分子通报,2018,4:27~35.

[4] Lloret E,Shahab A R,Linus M,Flatt R J,Gramazio F,Kohler M,Langenberg S. Comput Aided Design,2015,60:40~49.

[5] Khoshnevis B. Automat Constr,2003,13(1):5~19.

[6] Tramontin S M,Maia F I,Elisângela G M,Luciano S,Pedro N O A. J Build Eng,2020,32:101833.

[7] Long W J,Tao J L,Lin C,Gu Y,Liu M,Duan H B,Xing F. J Clean Prod,2019,239(12):118054.

[8] Nerella V N,Näther M,Iqbal A,Butler M,Mechtcherine V. Cement Concrete Comp,2018,95:260~270.

[9] Ma G,Wang L,Ju Y. Sci China Technol Sc,2018,61(4):475~495.

[10] Le T T,Austin S A,Lim S,Buswell R A,Gibb A G F,Thorpe T. Mater Struct,2012,45(8):1221~1232.

[11] Paul S C,Tay Y W D,Panda B,Tan M J. Arch Civ Mech Eng,2018,18(1):311~319.

[12] 朱彬荣,潘金龙,周震鑫,张洋. 材料导报,2018,32(23):4150~4159.

[13] 张守祺,昂源,李苗,辛鹏浩,杜仕朝,路振宝. 硅酸盐通报,2020,39(8):2433~2440.

[14] Hambach M,Volkmer D. Cement Concrete Comp,2017,79:62~70.

[15] Panda B,Paul S C,Tan M J. Mater Lett,2017,209:146~149.

[16] 曹明莉,许玲,张聪. 硅酸盐学报,2015,43(5):632~642.

[17] Christ S,Schnabel M,Vorndran E,Groll J,Gbureck U. Mater Lett,2015,139:165~168.

[18] Yang E,Li V. Constr Build Mater,2010,24(2):130~139.

[19] 俞家欢,魏正峰,刘明,张德刚,丁鑫. 混凝土与水泥制品,2013,03:34~39.

[20] Yu K,Yu J,Dai J,Lu Z,Shah S P. Constr Build Mater,2018,158:217~227.

[21] Li V,Wang S,Wu C. ACI Mater J,2001,98(6):483~492.

[22] Nematollahi B,Vijay P,Sanjayan J,Nazari A,Xia M,Nerella V N,Mechtcherine V. Materials,2018,11(12):2352.

[23] Nematollahi B,Xia M,Sanjayan J,Vijay P. Mater Sci Forum,2018,4755:155~162.

[24] 王圣怡,占羿箭,朱然. 建筑施工,2020,42(10):1913~1916.

[25] Ye J,Cui C,Yu J,Yu K,Dong F. Constr Build Mater,2021,281(4):122586.

[26] 汪群,高超. 低温建筑技术,2019,41(4):3~6.

[27] Malaszkiewicz D. Open Eng,2017,7(1):228~236.

[28] 蒯喜强,张涛,霍亮,李国友,张楠. 混凝土,2016,06:141~144.

[29] Ma G,Li Z,Wang L. Constr Build Mater,2018,162:613~627.

[30] Le T T,Austin S A,Lim S,Buswell R A,Law R,Gibb A G F,Thorpe T. Cement Concrete Res,2012,42(3):558~566.

[31] 徐卫国. 建筑技艺,2019,2:6~9.

[32] 张涛,蒯喜强,陈文洁,霍亮,李国友,戢文占. 硅酸盐学报,2019,47(11):1629~1634.

[33] 江世永,陶帅,姚未来,吴世娟,蔡涛. 材料导报,2017,31(24):161~168,173.

[34] Kamile T F,Burak F. Constr Build Mater,2013,41:15~20.

[35] Lim J H,Panda B,Pham Q C. Constr Build Mater,2018,178:32~41.

[36] 刘致远,王振地,王玲,赵霞. 硅酸盐学报,2019,47(5):648~652.

[37] Hambach M,Volkmer D. Cement Concrete Comp,2017,79:62~70.

[38] Wolfs R J M,Bos F P,Salet T A M. Cement Concrete Res,2019,119:132~140.

[39] Sanjayan J G,Nematollahi B,Xia M,Marchment T. Constr Build Mater,2018,172:468~475.

[40] Lim S,Buswell R A,Le T T,Austin S A,Gibb A G F,Thorpe T. Automat Constr,2011,21:262~268.

[41] Feng P,Meng X,Chen J F,Ye L. Constr Build Mater,2015,93:486~497.

[42] 孙晓燕,乐凯笛,王海龙,张治成,陈龙. 建筑材料学报,2020,23(6):1313~1320.

[43] Murcia D H,Genedy M,Taha M M R. Constr Build Mater,2020,262(11):120559.

[44] Nerella V N,Hempel S,Mechtcherine V. Constr Build Mater,2019,205:586~601.

[45] Ma G,Salman N M,Wang L,Wang F. Const Build Mater,2020,244(5):118305.

[46] Wang L,Tian Z,Ma G,Zhang M. Cement Concrete Comp,2020,110(7):103571.

[47] Marchment T,Sanjayan J,Xia M. Mater Design,2019,169(5):107684.

[48] Hosseini E,Zakertabrizi M,Korayem A H,Xu G. Cement Concrete Comp,2019,99:112~119.

[49] Vaganov V,Popov M,Korjakins A,Šahmenko G. Procedia Eng,2017,172:1204~1211.

[50] Jeevanagoudar Y V,Krishna R H,GowdaR,Preetham R,Prabhakara R. Constr Build Mater,2017,144:188~194.

[51] Maria S K G,Panagiotis A D,Maria G F,Stephanos F N. Cement Concrete Comp,2017,82:137~151.

[52] Ghazizadeh S,Duffour P,Skipper N T,Bai Y. Cement Concrete Res,2018,111:169~182.

[53] 曹明莉,张会霞,张聪. 哈尔滨工业大学学报,2015,47(12):26~30.

[54] Cao M,Xu L,Zhang C. Constr Build Mater,2018,171:736~742.

[55] Fan L,Wang L,Ma G,Li L,Xia M. J Zhejiang Univ Sci A-Appl Phys Eng,2019,20(9):675~684.

[56] Jolien V D P,Maxim D,Veerle C,Geert D S,Kim V T. Materials,2019,12(18):2993.

[57] Malaszekiewicz D. Open Eng,2017,7:228~236.

[58] Zhang Y,Zhang Y S,Liu G,Yang Y,Wu M,Pang B. Constr Build Mater,2018,174:263~271.

[59] Bohuchval M,Sonebi M,Amziane S,Perrot A. P I Civil Eng-Co,2020,174(3):1~34.

Research Progress of Polymer Fiber Reinforced 3D Printing Concrete Materials

LV Chun^{1*}, LIU Jie²

(1.College of Architecture and Civil Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China;

2.College of Light-Industry and Textile Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

Abstract: Polymer fiber materials have been widely used in the field of concrete technology due to their excellent properties. Using polymer fibers to replace traditional fibers such as steel fibers and carbon fibers in 3D printing concrete materials is an important way to reduce costs and improve material properties. The addition of polymer fiber reduces the fluidity of the concrete mixture, also endows it with good buildability, and also significantly enhances the flexural performance and toughness of the concrete. Adding different types of polymer fibers has little effect on the compressive strength of concrete. From the perspective of affecting the performance of 3D printing concrete materials, the performance and research status of 3D printing concrete materials mixed with polymer fibers were reviewed. Mainly from polyethylene (PE) fiber, polypropylene (PP) fiber, polyvinyl alcohol (PVA) fiber and other polymer fibers, the research status of the working performance, mechanical properties and durability of 3D printing concrete materials was summarized. At the same time, the bonding strength and anisotropy between concrete layers were summarized and analyzed. The problems of polymer fiber reinforced 3D printing concrete materials are put forward, and the development of polymer fibers in 3D printing concrete materials is prospected.

Key words: 3D printing concrete; Polymer fiber; Workability; Mechanical property; Durability; Interlayer bonding strength