

参考答案

1. 3D 打印混凝土中采用短纤维作为增强手段有哪些优势？请结合其作用机理和定向效应说明。

短纤维增强是一种经济且易于实施的手段，适用于 3D 打印一体化成型工艺中难以布设传统钢筋的情境。其增强机制主要依靠纤维的桥接作用来提升混凝土的抗裂与延展性。此外，在挤出打印过程中，纤维会在打印方向上发生定向排列，这种定向效应显著提高了结构在特定方向上的力学性能，但也增强了材料的各向异性，应在结构设计中充分考虑。

2. 在 3D 打印混凝土中，柔性短切纤维与刚性短切纤维有何不同？如何选择其类型与掺量。

柔性短切纤维(如 PE、PVA)可随打印流程定向排列，提升打印方向上的韧性与抗裂性，但过量可能影响泵送与挤出性能。刚性短切纤维(如钢纤维)能显著提升抗压、抗折与层间黏结强度。选择纤维类型与掺量需综合考虑增强效果、混凝土工作性及打印稳定性，通常掺量控制在 2% 以下，以保证流动性与力学性能的平衡。

3. 连续纤维增强技术在 3D 打印混凝土中如何实现？有哪些典型的实现方式？

连续纤维增强技术通过打印喷头同步布设钢缆、FRP 网格或纤维织物等材料，实现增强材料在打印过程中与混凝土协同成型。典型方式包括双喷头系统(分别控制混凝土与钢缆)、嵌入式环氧树脂纤维铺设工艺等。这些方式有效提升构件的弯曲强度和整体韧性，尤其适用于复杂曲面构件的结构增强，并可实现全流程自动化。

4. 请比较混凝土打印前配筋增强、同步打印配筋增强和打印后配筋增强三种方法的优缺点，并结合实际案例说明其适用场景。

(1) 打印前配筋增强：

优点：可预先安装钢筋骨架，增强结构整体性；适用于垂直构件(如墙体、柱子)。

缺点：限制打印头灵活性，单层打印高度受限，复杂结构适应性差。

案例：中国北京华商腾达科技有限公司采用叉形打印头在钢筋两侧同步打印混凝土，成功建造双层别墅。

(2) 同步打印配筋增强：

优点：自动化程度高，增强效果显著；适合层内方向配筋。

缺点：竖向配筋难度大，设备要求高，黏结强度较低。

案例：荷兰阿姆斯特丹的 3D 打印步行桥采用同步布设钢缆，结合后张拉技术增强垂直层间性能。

(3) 打印后配筋增强：

优点：灵活性强，可利用 3D 打印模板预留空腔后浇筑；适合复杂造型。

缺点：工序复杂，需额外浇筑步骤。

案例：Apis Cor 公司通过打印模板后置钢筋加固法建造了迪拜大型双层建筑。

5. 钢缆作为同步打印配筋材料时，存在哪些技术挑战？如何通过优化打印路径或工艺参数来解决这些问题？

技术挑战：钢缆表面光滑导致与混凝土黏结强度低；弯曲刚度限制打印路径自由度；多根钢缆同步输送可能牺牲黏结强度。

优化措施：①增加锚固长度以补偿黏结强度不足；②沿拉伸荷载方向布置钢缆，最大化抗拉性能；③结合后张拉技术增强垂直层间性能（如荷兰步行桥案例）；④调整喷嘴行进速度、直径和距离，优化层间互锁能力。