

含粗骨料 3D 打印混凝土可打印、力学、收缩性能与碳排放分析

张云升^{1,2}, 陈逸东¹, 刘 诚¹

(1. 东南大学材料科学与工程学院, 南京 211189; 2. 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050)

摘 要: 为阐明粗骨料对 3D 打印混凝土由打印到长期收缩过程的影响, 基于水泥浆体与骨料质量比(P/A)与粗骨料连续、间断级配进行了含粗骨料 3D 打印混凝土配合比设计, 测试了其可建造性、基本力学性能与干燥收缩性能。结果表明: P/A 值越低, 含粗骨料 3D 打印混凝土最大可建造高度越高, 力学与抗干燥收缩性能也可得提升; 间断级配时, 大粒径粗骨料比例过高将对可建造性与力学性能产生不良影响, 而在减少混凝土干燥收缩上具有良好作用。进一步探究了含粗骨料 3D 打印混凝土在生产制造阶段减少碳排放的效用, 并与 3D 打印砂浆、传统浇筑方法进行了对比。发现在 3D 打印混凝土技术中采用粗骨料可有效降低混凝土原材料生产阶段的碳排放, 但仍需进一步降低水泥材料的使用量; 3D 打印混凝土技术在减碳方面的优势主要依赖于无模化施工与减少劳动力的特点, 在生产阶段相比传统浇筑可减少 36.5% 的碳排放, 否则将产生约 2.6% 的更多碳排放。

关键词: 3D 打印; 混凝土; 粗骨料; 碳排放

中图分类号: TQ178 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)09-2153-13

网络出版时间: 2023-06-06



Printability, Mechanics, Shrinkage and Carbon Emission Analysis of 3D Printed Concrete with Coarse Aggregates

ZHANG Yunsheng^{1,2}, CHEN Yidong¹, LIU Cheng¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: This paper was to clarify the impact of coarse aggregate from printing to aging on 3D printed concrete. The mix design of 3D printed concrete containing coarse aggregate was conducted at a mass ratio of cement paste to aggregate (P/A) based on a continuous and discontinuous grading of coarse aggregate. The buildability, basic mechanical properties, and drying shrinkage properties were tested. The results show that the lower the P/A value is, the higher the maximum buildable height of 3D printed concrete containing coarse aggregate will be, improving the mechanical and drying shrinkage resistance. The excessive proportion of coarse aggregate with large particle sizes affects the constructability and mechanical properties but has a positive effect on reducing the drying shrinkage of concrete when using discontinuous coarse aggregate gradation. Also, the effectiveness of 3D printed concrete containing coarse aggregate in reducing carbon emissions during the production and manufacturing phase was investigated and compared with that of 3D printed mortar and conventional cast methods. Using coarse aggregate in 3D printing concrete technology can effectively reduce carbon emissions during the production stage of concrete raw materials, and it is still necessary to further reduce the use of cement materials. The advantages of 3D printing concrete technology in carbon reduction mainly depend on modeless construction and labor reduction characteristics. Compared to the conventional cast method, 3D printing concrete technology can reduce carbon emissions by 36.5% during production.

Keywords: 3D printing, concrete; coarse aggregate, carbon emission

收稿日期: 2023-02-24。 修订日期: 2023-03-27。

基金项目: 国家自然科学基金(U21A20150)。

第一作者: 张云升(1973—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2023-02-24. Revised date: 2023-03-27.

First author: ZHANG Yunsheng (1973—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: zhangyunsheng2011@163.com

由以二氧化碳(CO₂)为主的温室气体大量排放所引起的全球气候变暖及随之而来的生态、能源危机是当下日渐突出的严峻问题,中国于2020年9月相应明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标^[1]。近年来,随着我国经济与城市化进程的快速发展,建筑工程行业得到了充足发展,而建筑建造过程造成的大量碳排放也成为了当下亟待解决的重要问题^[2]。根据中国建筑节能协会发布的《2022 中国建筑能耗与碳排放研究报告》,中国2020年全建筑全过程碳排放总量达到 5.08×10^9 t,已占全国总碳排放量的50.9%^[3]。

3D 打印混凝土技术是通过计算机控制 3D 打印设备,将水泥基材料沿指定路径层层堆叠以生产预设的模型、结构的增材制造技术^[4–6]。当下,3D 打印混凝土技术作为一种新型建筑技术,因其在节能减排上的巨大潜力正逐渐得到建筑行业的关注。该技术以其特殊的无模化生产及半/全自动施工方法,可大大降低当前建筑行业的模板与劳动力成本、减少生产过程碳排放、提高生产材料的利用率并在复杂结构的生产中具有更佳的适应性^[7–9]。近年来,该技术已被实践于诸如桥梁、房屋、公交车站等各种建筑或基础设施建设工作中^[10–14],具备广泛的应用前景。

为充分满足送料时的泵送、挤出需要及堆叠过程中“站立成型”等工作性能的要求,目前大多数3D 打印混凝土实为无粗骨料组分的砂浆。由于砂浆材料的水泥及改性外加剂用量大,使其存在收缩大、成本高、环境可持续性低等诸项问题^[15–16]。若将粗骨料加入至混凝土中,可有效降低后者的长期收缩

与材料成本、进一步减少胶凝材料用量并有助于提高混凝土力学性能及相应结构刚度^[17–18]。然而粗骨料掺入 3D 打印混凝土后,由于材料颗粒粒径及内部颗粒间摩擦力的增大,将可导致打印过程中打印层断裂、堵塞甚至卡机等新问题^[19–21]。因此,充分协调掺粗骨料 3D 打印混凝土的可打印性与硬化后力学、干燥收缩性能,并将其应用于建筑或构件生产中是当前研究中须解决的重要问题。

本文首先通过浆体/骨料比、粗骨料级配 2 项因素设计了含粗骨料 3D 打印混凝土配合比,随后进行了可建造性、基本力学性能及长期干燥收缩性能测试并评价了 2 项因素的影响。此后从原材料生产至实际生产过程的阶段,计算并讨论了采用含粗骨料 3D 打印混凝土技术进行实际生产的减碳效果并进行了展望。

1 实验

1.1 原材料与配合比设计

试验中,胶凝材料为海螺牌 P.O. 42.5 水泥(PC),具体化学组分见表 1。细骨料采用细度模数为 2.19 的天然河砂,粗骨料采用粒径范围为 4.75~20.00 mm 的玄武岩石子。外加剂中使用了减水率 34%、固含量 30%的聚羧酸高性能减水剂(PCE)及 20 万单位黏度的羟丙基甲基纤维素醚(HPMC)。

基于水泥浆体与骨料的质量比(浆骨比, P/A)及粗骨料级配共设计了 6 个配比,如表 2 所示。其中,涉及 3 种浆骨比(0.9、0.75、0.5),4 种粗骨料级配(粒径分布曲线见图 1),所有组水灰质量比(W/C)均为 0.3。P 组为符合 GB/T 14685—2022《建设用卵石、

表 1 胶凝材料化学组成
Table 1 Chemical Composition of cement by mass ratio

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	(Na ₂ O) _e	MgO	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	L.O.I
68.05	18.52	4.15	2.01	0.23	1.15	1.07	3.34	0.24	0.11	1.13

w—Mass fraction.

表 2 配合比设计
Table 2 Mix Proportion design

Mix	P/A rate	Cement slurry	$\rho(\text{basalt stones})/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$					Sand	PCE	HPMC
			4.75–10.0 mm	10–20 mm	4.75–9.50 mm	9.5–16.0 mm	16–20 mm			
P1	0.9	1123.7	438.6	304.4				495.4	3.94	0.63
P2	0.75	1014.9	488.1	338.8				551.3	3.94	0.63
P3	0.5	845.2	565.3	392.4				638.5	3.94	0.63
S	0.75				830.2			551.3	3.94	0.63
M	0.75	1014.9			0	830.2	0	551.3	3.94	0.63
L	0.75				83	166	581.2	551.3	3.94	0.63

P/A—Volume ratio of cement paste to aggregates; PCE—Polycarboxylic water-reducing agent; HPMC—Hydroxypropyl methyl cellulose ether.

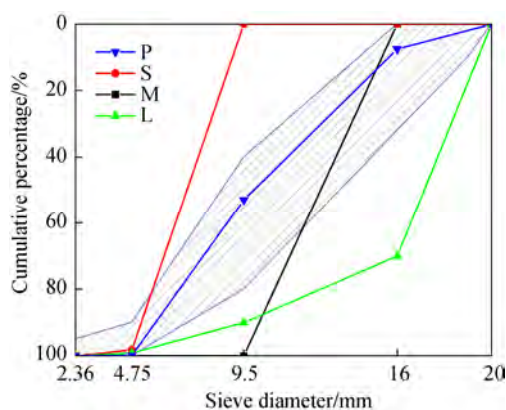


图 1 各配合比粗骨料级配曲线

Fig. 1 Grading curves of coarse aggregate of each mix proportion

碎石》中规定的粗骨料连续级配组, 且其相应的仅分为 4.75~10 mm 与 10~20 mm 级别, 连续级配的规范定义范围如图 1 中阴影区域所示; S、M、L 分别代表以 4.75~9.50 mm、9.5~16.0 mm、16~20 mm 的小、中、大石子为主的级配。其中, L 组并非全部以大石子填充, 因预实验发现全部粗骨料均为大石子时将导致严重的卡机问题。

1.2 样品制备

采用 230 型手推式滚筒搅拌机制备测样品品, 首先将水泥和骨料搅拌 3 min 至均匀, 随后将混合有 PCE、HPMC 的水溶液加入并继续搅拌 5 min, 搅拌完成后立即展开初始性能的测试或填入 3D 打印机中进行打印工作。3D 打印过程中采用了本课题组自研的挤出式含粗骨料混凝土 3D 打印机, 其跨度为 3 000(X) mm×1 000(Y) mm×650(Z) mm, 具备打印系统、控制系统及轨道系统, 可完成含最大 25 mm 粗骨料粒径混凝土的打印工作, 更为详细的资料可见于^[22]。为确保 3D 打印过程中混凝土的顺利挤出, 设置了直径为 50 mm 的圆形挤出喷嘴。在进行 3D 打印过程时, 往往含粗骨料混凝土将出现层结构向外扩展的现象^[22], 因此实际打印出的条带宽度在 55 mm 左右。首层打印时, 设定喷嘴距离地面 30 mm, 之后的层结构累积中各层也均抬升 30 mm 以保证各层厚度基本一致。

1.3 样品表征

1.3.1 可建造性 可建造性是评估打印混凝土材料在被挤出形成多层结构过程中保持原有形状而不发生结构性坍塌或流动的能力^[23]。将上述打印混凝土材料拌和后, 立即进行长 400 mm 单条连续堆叠的打印过程至最终倒塌(或堵塞), 记录所形成的多层结构最大层数, 并在打印过程中通

过摄像机与标尺实时记录倒塌前的最大建造高度, 见图 2。



图 2 可建造性测试示意图

Fig. 2 Buildability test diagram

1.3.2 基本力学性能 首先 3D 打印出 1 400 (X) mm×110 (Y) mm×120 (Z) mm 的 4 层双条大型混凝土试块。由于 3D 打印试块往往 2 端为圆角边, 因此为确保样品的同质性, 在标准养护室内养护 28 d 后沿 X 方向将其切割为 2 个 100 mm×100 mm×400 mm 及 4 个 100 mm×100 mm×100 mm 试块以分别用于立方体抗压强度测试与抗折强度(三点)测试, 如图 3a 所示。基本力学性能由不同方向的抗压强度和抗折强度表征, 以调查其力学性能及各向异性, 加载方向如图 3b 所示。

1.3.3 干燥收缩性能 首先 3D 打印出 500(X) mm×110(Y) mm×60(Z) mm 的 2×2 多层结构, 同样由于 3D 打印试块往往 2 端为圆角边, 因此须在其打印完成静置 1 d 后 2 端各切去 50 mm 形成平行的平面以进行干燥收缩实验。

图 4 为干燥收缩测定装置。由图 4 可见, 将处理后的 3D 打印试块置于一固定架台中, 在架台上端的洞口内安装并固定一电子数字测微计(EDM), 令其稍接触试块并记录下初始读数。整个装置在试块切割 1 d 后置于相对湿度为 50%、温度为 20 °C±2 °C 的恒温恒湿室内, 于之后的 120 d 内持续进行 EDM 的示数记录, 以之后记录的数据与初始读数之差与样品长度的比值作为试块的干燥收缩值, 以×10⁻⁶计。根据式(1)计算混凝土的干燥收缩值 D:

$$D = \frac{D_n - D_0}{L} \quad (1)$$

式中: D—混凝土干燥收缩值(×10⁻⁶); D_n—混凝土测试开始第 n d 测得的 EDM 示数(mm); D₁—混凝土测试开始第 1 d 测得的 EDM 示数(mm); L—混凝土试块长度(400 mm)。

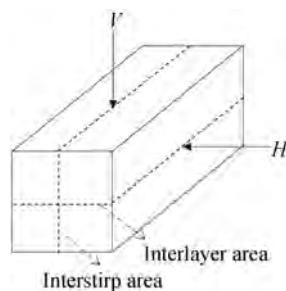
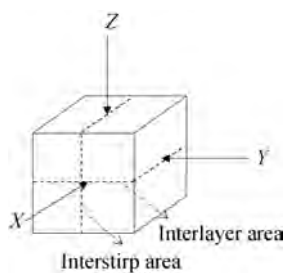
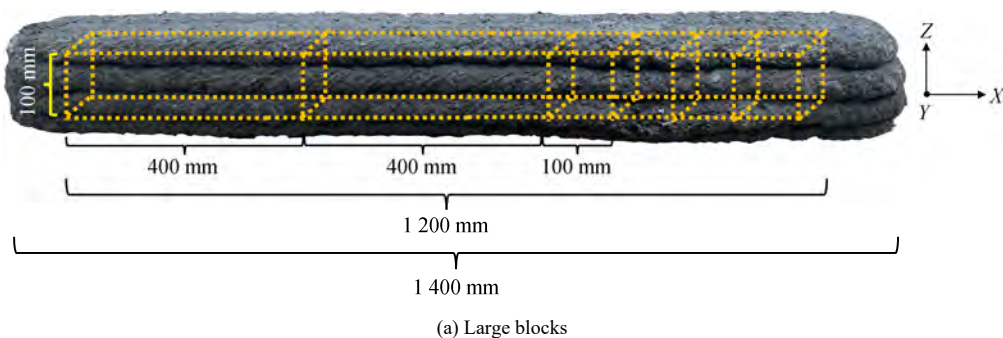


图3 大型试块切割为 100 mm×100 mm×100 mm 与 100 mm×100 mm×400 mm 试块

Fig. 3 Cutting large blocks to 100 mm×100 mm×100 mm and 100 mm×100 mm×400 mm prisms

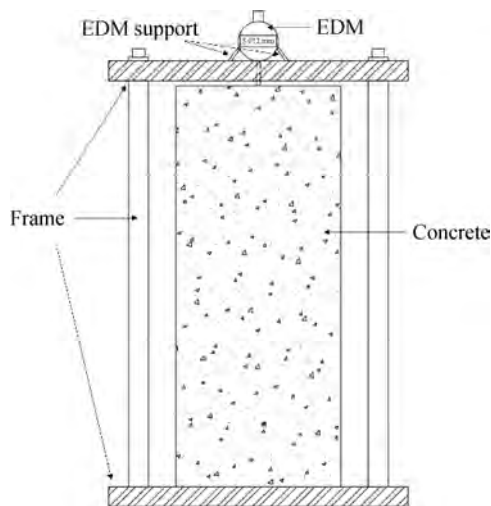


Fig. 4 Drying shrinkage measuring device

2 结果与讨论

2.1 可建造性

图5为各组可建造性测试的测量结果,包括最大打印高度与平均层厚数据。由图5可见,随P/A提高,混凝土多层结构最大可建造高度及平均层厚均逐渐提高,P2、P3组的可建造高度明显高于其它组。含粗骨料3D打印混凝土在如P1高水泥浆条件下因富余浆体量过多,粗骨料的空间网络效应难以得到发挥,使得混凝土材料的初始强度降低、流动性增大而不易产生较好的可建

造性^[24–25]。对于使用间断级配下的含粗骨料3D打印混凝土配比,其最大可打印高度明显不及连续级配的P2组,而进一步讨论须结合倒塌形式进行。

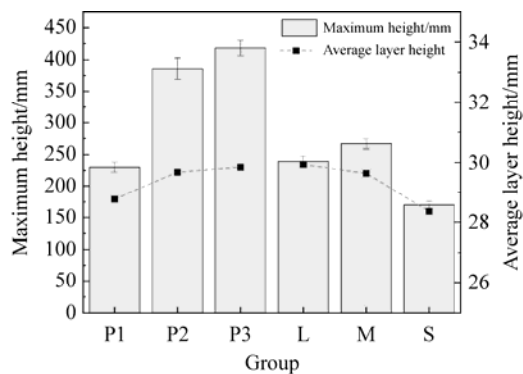


图5 各组最大打印高度与平均层高

Fig. 5 Maximum print height and average layer height of each group

根据实验结果归纳了4种基本可建造性失效形式,第1种为整体失稳倒塌形式,如图6a~图6b所示,其对应P2、P3采用连续级配且骨料含量较高的2组,它们在逐渐堆叠的过程中不易发生局部的变形,而是因层数过高最终产生失稳。虽然其二者的失效形式一致,但P3表面存在的孔洞和缺陷比P2要明显与密集得多,主要是由于P3中粗骨料含量上升后使包裹粗骨料的浆层厚度相对降低,在挤

出时更容易出现断裂导致^[26]。鉴于 P2、P3 的平均层厚基本接近于预设值(分别为 29.7、29.8 mm), 因此仍是一种较为合理和理想的建造性状态。第 2 种为局部变形引起的失效形式, 如图 6c 所示, 其对应全部使用 9.5~16.0 mm 的 M 组。这类局部变形的原因主要为在多层结构累积的过程中, 由于粗骨料的分布状态不足以形成完整紧密的混凝土内部空间骨架, 下部层浆体的变形与流动也将无法被有效的束缚, 最终在无侧支撑的情况下出现突然的局部变形并最终导致整体的失效。第 3 种为挤出材料中断的形式, 如图 6d 所示, 对应粗骨料大部分使用大石子的 L 组, 其平均层厚最接近于设定厚度 (29.9 mm)。然而, L 组在打印过程中 3D 打印机需持续克服较大的摩擦力以挤出材料, 这导致了在喷嘴附近出现了热量累积的现象致使浆体失水; 加之

大石子在喷嘴附近更容易发生机械连锁的问题, 3D 打印机在打印过程后期仅能挤出浆体和部分粗骨料, 其它粗骨料几乎均在喷嘴附近被锁死, 最终导致打印过程中断。第 4 种为过度膨胀失效形式, 如图 6e 所示, 对应粗骨料均为小石子的 S 组与 P/A 值最高的 P1 组。此 2 组分别由于内部粗骨料过小与过少而导致无法提高足够的支撑能力, 其打印时的行为更接近于砂浆自身的性质, 进而使打印结构下层不足以为新层提供足够的支撑, 并且在相同的打印机转速下可能会被挤出更多的材料^[20], 最终导致了层结构过度侧向塌落而失效。上述结果表明, 合理的 P/A 与连续粗骨料级配对于保证 3D 打印含粗骨料混凝土可被有效地生产具有重要意义, 推荐使用基于 P2 的配合比以得到初始质量更好的 3D 打印多层结构。



图 6 4 种建造性倒塌或失效形态

Fig. 6 Four constructive collapse or failure modes

2.2 P/A 与粗骨料级配对力学性能的影响

养护 28 d 后测试的各组立方体抗压与抗折强度测试结果如图 7 所示, 为进一步讨论各向异性的程度, 按照根据式(2)~式(3)计算得各个配比的各向异性程度以及相应加载方向的差异度(见表 3)。结果表明, 含粗骨料 3D 打印混凝土样品无论何种配比的抗压强度均表现出明显的各向异性, 其中抗压强度 $Y > Z > X$, 抗折强度 $V > H$ 。这种力学的各向异性特性在多个 3D 打印混凝土相关研究中被发现, 而各个研究材料与打印工艺互不相同, 各种大小关系均有可能出现^[27-30]。

无论从抗压或抗折强度说, 由于 P/A 值越低, 混凝土内弹性模量与强度更高的粗骨料成分将会占更高的绝对比例, 进一步地将提高混凝土整体的强度^[31], 并且这一强度的增长并不会因为加载方向的改变而发生变化, 因而对含粗骨料 3D 混凝土设计时, 应尽可能在保证可打印性的同时增高骨料的绝对比例。另外, 由表 3 可知, P1 组~P3 组在抗压与抗折强度上的 N_i 相互之间的差异并不明显, 而 L 组、M 组、S 组的强度均呈现了 $S > M > L$ 的关系, 其中 S 组的强度已经超过了 P3 组。联系到各组打印时的状态, 这些现象应与小石子的骨架填充性和

内部结构完整性较其它包含 9.5~20.0 mm 石子的组更好有关；从骨料级配，只含 4.75~9.50 mm 粗骨料的 S 组内部骨料间距更近且波动小，这保证了打印出的混凝土受到外荷载时可以充分将外力在内部

进行分散与传递^[32-34]。相反地，L 组的强度是所有组中最低的，因其石子的体积更大则在相同的粗骨料掺量下各个粗骨料之间的间距更远，不足以形成足够紧凑的内部结构。

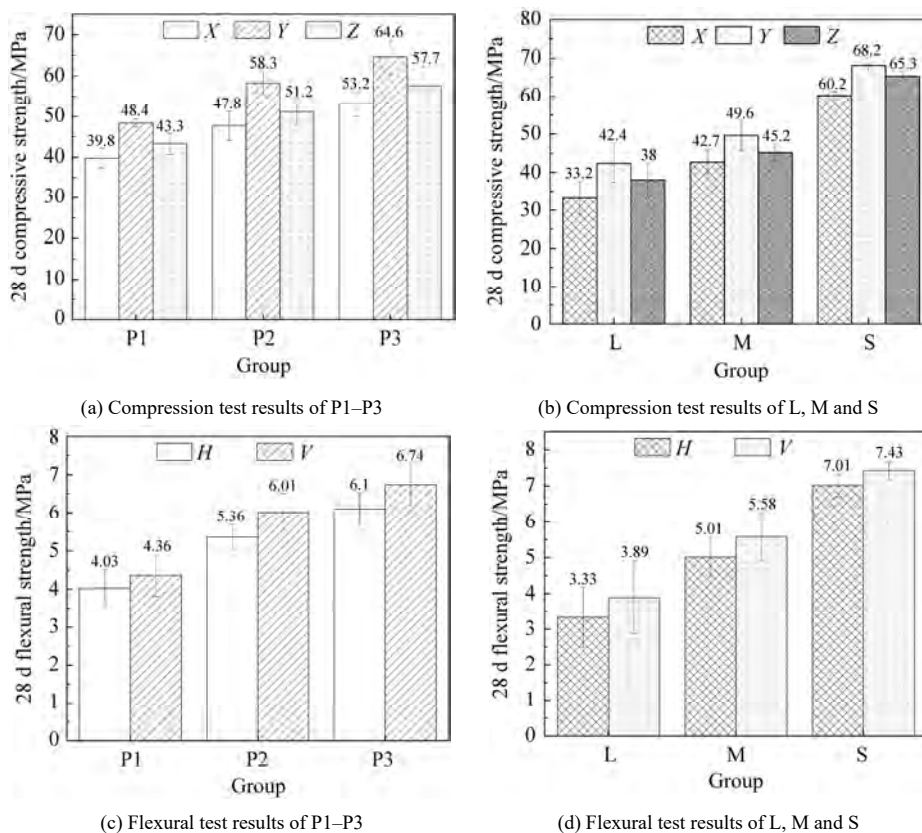


图 7 抗压及抗折测试结果

Fig. 7 Compression test and flexural test results of each group

表 3 基本力学性能测试结果平均值与各向异性度

Table 3 Average value and anisotropy of basic mechanical property test results

Group	P_{ave} (compressive)/MPa	N_x /%	N_y /%	N_z /%	P_{ave} (flexural)/MPa	N_V /%	N_H /%
P1	43.83	-9.2	10.4	-1.2	4.19	-3.9	3.9
P2	52.44	-8.8	11.2	-2.3	5.69	-5.7	5.7
P3	58.50	-9.1	10.4	-1.4	6.42	-5.0	5.0
L	37.86	-12.2	11.9	0.3	3.61	-7.8	7.8
M	45.81	-6.9	8.2	-1.3	5.45	-5.4	5.4
S	64.56	-6.7	5.6	1.2	7.22	-2.9	2.9

P_{ave} (Compressive) is the average compressive strength of specimens; N_x , N_y and N_z are the difference between the x, y, z and the P_{ave} (Compressive). N_V and N_H are the difference between the V, H directions and the P_{ave} (Flexural).

此外，X 方向上强度最低的原因是其加载方向平行于打印方向，而打印方向上条间的裂缝和孔隙往往将贯通于整个样品，由于立方体样品存在 2 个条间区域，则样品中心部分将成为裂缝贯通最甚之处，从而混凝土在受到 X 方向外力时承载力将大幅降低^[35]；Z 方向加载时，其力方向虽亦平行于条间裂缝，但并非是从裂缝贯通方向进行加载，因此

强度稍高；而 Y 方向加载时其力方向垂直于条间裂缝，因此裂缝的开展过程将大大减缓，从而承载力得以提高^[22]。对于抗折强度在 H 与 V 方向产生的差异，实际与 Y、Z 方向之间的差异来源一致。结合中国国家标准 GB《混凝土结构设计规范》中 4.1.2 的条目规定^[36]，各个配比下的 3D 打印混凝土强度等级对于当前常规工程施工的混凝土强度要求已基

本满足。

$$P_{ave}(\text{MPa}) = (P_1 + P_{\dots} + P_i) / i \quad (2)$$

式中: P_{ave} 指各个方向强度值的平均值; i 指某加载方向; P_i 指某方向上的强度。

$$N_i(\%) = \frac{P_i - P_{ave}}{P_{ave}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: N_i 指某加载方向与均值间的差异度。

2.3 P/A 与粗骨料级配对干燥收缩的影响

混凝土的干燥收缩一般指混凝土在大气中暴露的过程中因孔隙水散失而引起的体积微变形, 3D 打印砂浆材料的高收缩始终是目前在应用 3D 打印技术进行建筑生产时的一个不可忽视的问题, 因此对于将粗骨料掺入 3D 打印混凝土中以减少收缩的设想一直被高度重视^[37-38]。为充分对比 P/A 值与粗骨料级配对干燥收缩的影响, 除测得的含粗骨料 3D 打印混凝土收缩值外, 还附加了 Zhang 等报道的 3D 打印砂浆干燥收缩值^[39]以供对比, 结果如图 8 所示。特别是, 干燥收缩测试的环境条件均与文献^[37]一致。

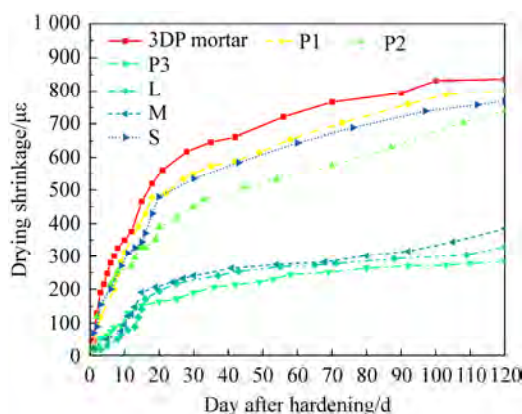


图 8 各组干燥收缩测试结果

Fig. 8 Drying shrinkage test results of each group

首先可见含粗骨料 3D 打印混凝土无论配比如何, 其长期收缩值均低于 3D 打印砂浆材料, 并且与 Rahul 等^[37]的研究以 30 d 为比较时间节点, 总体收缩值比含最大粒径 8 mm 粗骨料的 3D 打印混凝土还要低, 这是由于粗骨料的弹性模量往往是水泥浆基质的数倍, 因此其具有限制混凝土体积变化的作用^[40], 而这一效用也随着粗骨料的掺量与级配发生着变化。首先可见 P1 组~P3 组的收缩呈现了不同的趋势, 其中 P1 组的收缩值在 15 d 左右前已经几乎接近于 3D 打印砂浆材料, 之后收缩值方才逐渐减弱了增长, 但最终 120 d 时收缩值仅比 3D 打印砂浆低 40 $\mu\epsilon$ 左右。P2 组虽然亦有初期收缩快速增长

的趋势, 但在 10 d 左右这种增长逐渐减弱, 最终收缩值低于 P1 组。P3 组因其内部粗骨料含量高, 在初始状态下也并未出现过快的增长, 并且在 20 d 后收缩增长几乎停滞, 最终的收缩值与普通混凝土类似^[41]。

在 3 个不连续级配组中, S 组的增长趋势与 3D 打印砂浆及 P1 组的增长趋势略有相似, 120 d 时的收缩值也仅比 3D 打印砂浆低 70 $\mu\epsilon$ 。M 组和 L 组收缩的快速初始增长期在约 20 d 时即结束, 虽粗骨料含量较 P3 组少, 但由于二者内部的粗骨料粒径更大, 对周边水泥基体的束缚与拉结作用更强^[42-43], 因此展现了良好的抗收缩效果。由此可见, 掺入粗骨料的 3D 打印混凝土与砂浆材料相比, 在长期干燥收缩上的表现更加优异, 并且可以通过调控配比中粗骨料含量或级配的方式进行有效调控。

3 含粗骨料 3D 打印混凝土生产制造减碳分析

3.1 基本能源碳排放分析

建筑领域的温室气体排放绝大多数发生在制造和使用 2 个阶段^[44], 其中制造阶段包括原材料的开采、运输、加工和建筑材料的生产、运输, 以及建筑建造过程。首先, 进行了制造阶段所用化石能源与电力的碳排放因子(CEF)调查。由于不同国家与地区的碳排放因子库均各有差异, 因此选择了对国内外权威机构的碳排放因子库进行综合分析^[45-47], 结果见表 4 和表 5。最终选定各类化石能源碳排放因子, 其中煤炭为 2.676 kgCO₂e/kg, 石油为 2.067 kgCO₂e/kg, 天然气为 1.567 kgCO₂e/kg, 以及电力排放因子 1.014 kgCO₂e/kW·h。

3.2 混凝土原材料生产与运输阶段碳排放分析

从实验室级混凝土材料生产制造阶段角度出发, 分析使用含粗骨料 3D 打印混凝土、3D 打印砂浆、传统浇筑 3 种模式在此阶段的碳排放计算, 所涉及方面如图 9 所示。其中, 原材料生产与运输阶段产生的碳排放主要包括建筑材料生产的碳排放以及各类机械设备用电以及燃料的消耗, 计为 C_1 , 此阶段可由式(4)进行计算:

$$C_1 = CM + C_t = \sum_{i=1}^n (CM_i \times m_i) + C_t \quad (4)$$

式中: CM —原材料生产的总碳排放量(kgCO₂e); CM_i —第 i 种原材料生产的单位碳排放量(kgCO₂e/t); m_i —第 i 种原材料的用量(t); C_t —原材料运输过程

中产生的碳排放量(kgCO₂e/t)。原材料运输过程的碳排放量(C_t)主要指由生产厂家运输到混凝土结构施工现场过程产生的碳排放,此种主要由运输工具能源消耗所决定,计为 C_t , 计算方法如式(5):

$$C_t = \sum_{i=1}^n C_{ti} \times m_i \times D_i \tag{5}$$

式中: C_{ti} —第 i 种原材料的单位运输重量碳排放量(kgCO₂e /t·km); m_i —第 i 种原材料的用量(t); D_i —第 i 种原材料的运输距离(km)。

表 4 化石能源碳排放因子
Table 4 Carbon emission factors (CEF) of fossil energy

Source	Coal (kgCO ₂ e/kg)	Oil (kgCO ₂ e/kg)	Gas (kgCO ₂ e/m ³)
Chinese Academy of Engineering ^[48]	2.493	1.980	1.503
Energy Research Institute of National Development and Reform Commission ^[49]	2.734	2.167	1.624
Climate change project of the National Science and Technology Commission ^[48]	2.662	2.134	1.500
National Environment Agency Greenhouse Gas Control Project ^[48]	2.734	2.138	1.628
United Nations Intergovernmental Committee on Climate Change ^[50]	2.761	2.149	1.643
US Department of Energy ^[51]	2.574	1.753	1.426
Japan Institute of Energy Economics ^[52]	2.772	2.148	1.646

CEF refers to the carbon emission factor; Average CEF of coal, oil, and gas are 2.676, 2.067 kgCO₂e/kg and 1.567 kgCO₂e/m³, respectively.

表 5 电力排放因子
Table 5 Power emission factors

Source	CEF (kgCO ₂ e/kWh)	Mean
Chinese Academy of Engineering ^[48]	0.953	1.014
Climate change project of the National Science and Technology Commission ^[48]	1.019	
National Environment Agency Greenhouse Gas Control Project ^[48]	1.049	
US Department of Energy ^[51]	0.986	
Japan Institute of Energy Economics ^[52]	1.063	

Average CEF is 1.014 kgCO₂e/(kW·h).

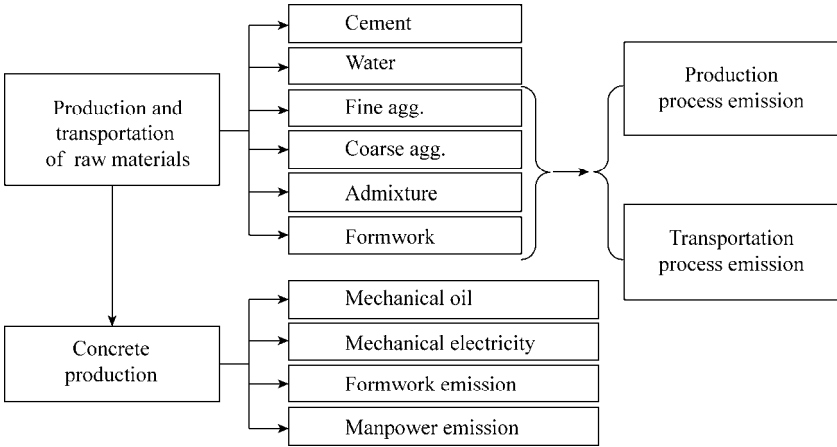


图 9 混凝土制造阶段碳排放计算内容
Fig. 9 Carbon emission calculation content in concrete manufacturing stage

原材料的品类项目较为复杂,本文对生产混凝土所需的水泥、水、细骨料、粗骨料、外加剂及木模板的生产过程碳排放因子进行了广泛调查并取均值,尤其参考了国标 GB/T51366—2019《建筑碳排放计算标准》,最终结果如表 6 所示。此外,对于原材料运输到生产现场的距离和相关的运输过程碳排

放因子也进行了调查,结果如表 7 所示,其中,考虑了粉煤灰与硅灰往往原产地不在当地,砂石供应厂往往不为同一家供应商的问题。

含粗骨料 3D 打印混凝土相较于 3D 打印砂浆及普通混凝土配合比的不同,必然会导致相应混凝土材料碳排放量的不同,因此需对比上述工艺下混凝

土配合比的碳排放情况。在进行配合比选择时,主要考虑到了以下因素:首先,混凝土强度等级差异不超过 20 MPa;其次,配合比的设计应符合目前 3D 打印混凝土或砂浆的一般设计原则(诸如胶凝材料与骨料的比例、水灰比等);最后,所选择的配合比应不包括难以界定碳排放量的成分,诸如各类纤

维组分或特种化学外加剂类型以避免碳排放量计算特殊化。含粗骨料 3D 打印混凝土(3DPCC)选取了本文中 P2 配比以及 Xiao 等^[56]的配合比;3D 打印砂浆材料(3DPM)选用了目前国内外经典配比,普通混凝土材料(OC)通过查阅《混凝土配合比设计手册》^[57]计算而得,上述各统计结果列于表 8:

表 6 混凝土原材料生产阶段碳排放因子统计表
Table 6 CEF statistics of concrete raw material production stage

Kind	Items	CEF (kgCO ₂ e/unit)	Source
Portland cement	Cementitious material (t)	735	GB/T51366—2019
Fly ash	Cementitious material (t)	19.1	Yang ^[53]
Silica fume	Cementitious material (t)	14	Gabi database
Tap water	Water (t)	0.17	GB/T51366—2019
Natural sand	Fine aggregate (t)	2.51	GB/T51366—2019
Recycled sand	Fine aggregate (t)	3.68	Xiao et al. ^[54]
Crushed stone	Coarse aggregate (t)	2.18	GB/T51366—2019
Recycled coarse aggregate	Admixture (t)	2.35	Xiao et al. ^[54]
Superplasticizer	Admixture (t)	1 064	Moghadam ^[55]
Ordinary wood, plywood, particleboard	Formwork (m ³)	501	Zhang ^[46]

表 7 混凝土生产原材料运输过程 CEF 统计表
Table 7 CEF statistical table of transportation process of raw materials for concrete production

Items	Distance /km	CEF (kgCO ₂ e/(t·km))	Conveyance	Source
Cement	35	0.104	Heavy gasoline truck	GB/T51366—2019
Fly ash	300	0.01 + 0.104	Rainway + Heavy gasoline truck	GB/T51366—2019
Silica fume	200	0.01 + 0.104	Rainway + Heavy gasoline truck	GB/T51366—2019
Fine aggregate	50	0.104	Heavy gasoline truck	GB/T51366—2019
Coarse aggregate	50	0.104	Heavy gasoline truck	GB/T51366—2019
Admixture	10	0.334	Light gasoline truck	GB/T51366—2019
Formwork	20	0.115	Medium gasoline truck	GB/T51366—2019

表 8 典型 3D 打印混凝土/砂浆与传统浇筑混凝土配比
Table 8 Typical 3D printing concrete/mortar and conventional pouring concrete mix proportion kg/m³

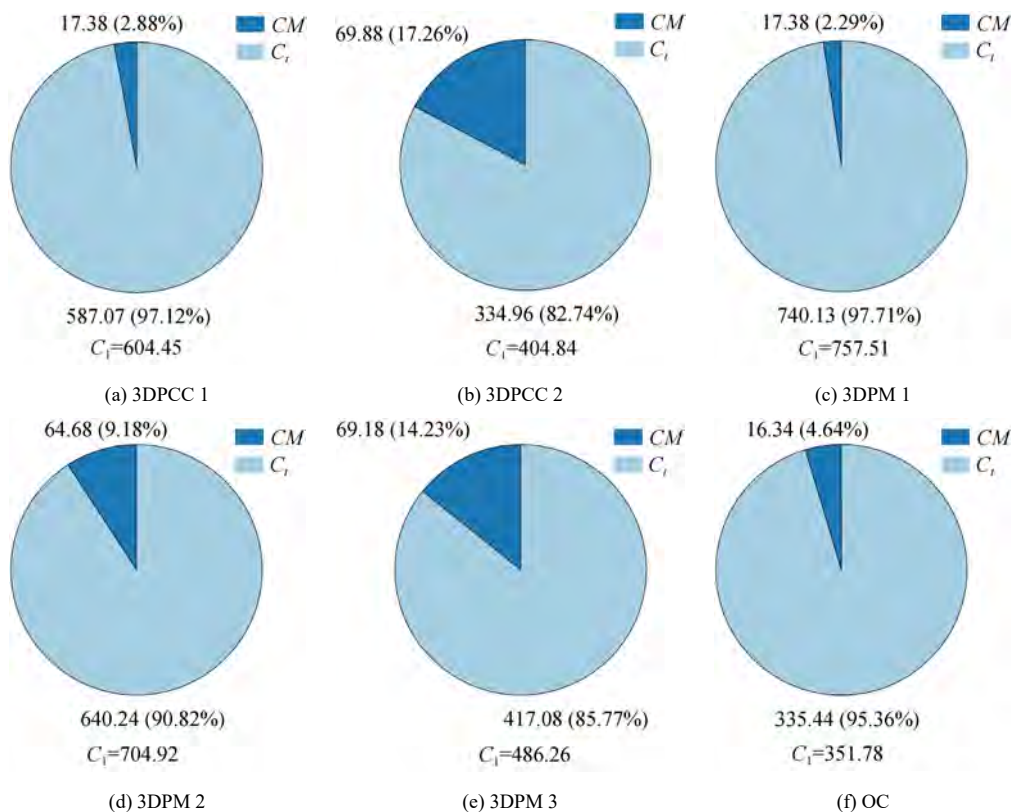
Component	Type	3DPCC 1	3DPCC 2 ^[56]	3DPM 1 ^[58]	3DPM 2 ^[59]	3DPM 3 ^[60]	OC
Cementitious material	Portland cement	788.6	444	1000	864	546	451
	Fly ash		96.6		18	156	
	Silica fume		41.4		18	78	
Water	Tap water	236.6	275.5	395	288	219	194
Fine aggregate	Natural sand	551.3		500	900	1 171	562
	Recycled sand		818	500			
Coarse aggregate	Crushed stone	826.9					1 152
	Recycled coarse agg.		541				
Admixture	Superplasticizer	3.94	1.75	1.85	2.16	8.2	

根据以上统计信息以及式(3)和式(4)计算得各工艺和配比在 1 m³下的原材料生产以及运输过程碳排放,以及各配合比在总碳排放量内此二者分别所占的比例。计算结果见图 10,其中,OC 考虑了模

板运输过程产生的碳排放。可见,3D 打印混凝土材料各配合比总碳排放量相对于 OC 整体上较高,其主要来源以水泥的使用为主。然而,亦可发现若采用掺加低碳材料如再生骨料、粉煤灰材料的方式可

有效降低碳排放, 诸如 3DPCC 2 与 3DPM 3 的 2 种配合比设计方法。此外, 若 3D 打印混凝土配合比

中内掺或添加了不同的材料种类, 将可能面临运输阶段碳排放量所占比例大幅提高的问题。



CM—Total carbon emissions from raw material production; C_t—Total carbon emissions during raw material transportation.

图 10 各配合比在 1 m³ 体积条件下原材料生产以及运输过程碳排放及总排放量(单位: kgCO₂e)

Fig. 10 Carbon emissions and total emissions during raw material production and transportation at a volume of 1 m³ for each mix ratio (unit: kgCO₂e)

3.3 混凝土生产阶段碳排放分析

3D 打印混凝土技术在进行混凝土生产时与传统浇筑工艺相比, 除混凝土拌和过程基本一致外, 其无需过多人力与模板工程, 因此本节中以 25 个 400 (高) mm×100 (宽) mm×2000 (长) mm (体积为 0.04 m³) 的无筋梁为假设实验室级生产目标, 试比较各工艺在混凝土生产阶段的碳排放差异。其中, 对于传统浇注工艺, 按照一般施工要求设定其使用厚 17 mm 的模板; 3D 打印机无需模板, 但生产过程中仍需要利用电力为 3D 打印机供电, 而由于世界各地 3D 打印机样式均有不同, 本文 3D 打印机的能耗按照自研版的功率与各类 3D 打印机的资料进行平均计算^[45], 为 8.30 kW·h。此外, 虽然国内外研究往往不将人力产生的碳排放计入到施工阶段碳排放中, 但为精确阐明 3D 打印技术与传统浇筑模式之间的碳排放差异, 采用了焦双健等^[61]计算的劳动力碳排放因子。此外, 鉴于此假设目标生产过程中基本无需用油设备, 因此忽略相关设备的碳排放过程。

各个生产过程涉及到的碳排放列于表 10, 各类涉及到的设备工作时间基于课题组之前在工厂生产的经验的工时估算而来。对于传统浇筑手段涉及的机械工程, 主要包括模板的加工、混凝土搅拌与振捣、试件吊装过程, 若利用 3D 打印技术则可免除模板加工与混凝土振捣过程。其中, 须说明的是对于 OC, 仍需加入此情景下所需的模板体积和因生产与运输产生的碳排放量, 算得模板工程(拆除已算入劳动力项)将产生 400.29 kgCO₂e。混凝土生产阶段的总碳排放 C_p 计算公式如式(6):

$$C_p = \sum_{i=1}^i C_{pi} = \sum_{i=1}^i C_{ei} \times t_{wi} = \sum_{i=1}^i E_{ei} \times P_n \times t_{wi} \quad (6)$$

式中: C_p—混凝土生产阶段总碳排放量(kgCO₂e); C_{pi}—第 i 种生产流程总碳排放量(kgCO₂e); C_{ei}—第 i 种生产流程每小时碳排放量(kgCO₂e/h); t_{wi}—第 i 种生产流程工作时长(h); E_{ei}—第 i 种生产流程每小时能源消耗量(kW·h 或 kg); P_n—能源或电力碳排放因子(kgCO₂e/(kW·h)或 kgCO₂e/kg)。

表 9 传统浇筑与 3D 打印混凝土工艺生产阶段生产碳排放

Table 9 Production carbon emissions in the production stage of traditional pouring and 3D printing concrete technology

Production method	Items	$E_{ei}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	C_{ei}	t_{wi}	C_{pi}	C_p
OC	Vortex paddle mixer (250 L)	34.10	34.58	4	138.32	1 151.39
	Woodworking circular saw	24.00	24.34	10	243.40	
	Concrete troweling	23.14	23.46	6	140.76	
	Portal crane	88.29	89.53	2	179.06	
	Heavy labor		0.118	420	28.32	
	Formwork production		400.29			
3D printing	3D printer	8.30	10.20	48	302.98	731.14
	Vortex paddle mixer (250 L)	34.10	34.58	4	138.32	
	Portal crane	88.29	89.53	2	179.06	
	Moderate labor		0.100	96	3.60	

E_{ei} is the hourly energy consumption of the i^{th} production process (kW·h or kg); C_{ei} is the hourly carbon emissions of the i^{th} production process (kgCO₂e/h); t_{wi} is the working duration of the i^{th} production process (h); C_{pi} is the total carbon emissions of the i^{th} production process (kgCO₂e); C_p is the total carbon emissions during concrete production stage (kgCO₂e).

因此可共计算得传统浇筑方式与 3D 打印方式在进行此种生产过程中的总碳排放量分别可计为 1 151.39 kgCO₂e 与 731.14 kgCO₂e, 3D 打印方式比传统浇筑减少了 36.5%的碳排放。然而在忽略模板工程所需的排放后, 3D 打印方式将比传统浇筑产生约 2.6%的更多碳排放, 此次估计中因 3D 打印机的功率与工作时长或在后续研究中进一步统计, 但仍可认为 3D 打印方式因电力消耗产生的碳排放不容小视。

3.4 碳排放结果分析与展望

根据上述统计与计算结果可发现, 使用 3D 打印技术进行混凝土材料生产时, 原材料中水泥的使用是占比最大的碳排放来源, 其掺量往往较传统浇筑方式高出了 30%~121%。虽然各类低碳胶凝材料与外加剂的使用可以有效地降低原材料生产的碳排放, 但因其原材料产地与实际生产地往往有一定距离, 对应运输过程的碳排放也不容小视。因此, 3D 打印技术在原材料生产阶段减碳方面的未来发展应注重进一步减少水泥用量, 提高粗骨料使用比率、尽可能减少所用材料品类, 改复掺为单掺、因地制宜地选择原材料并保证性能稳定性。尤其在含粗骨料 3D 打印混凝土的开发中, 根据前文内容可知其在力学与收缩性能上具有充足的工程应用能力, 减碳效用较 3D 打印砂浆材料整体上较优, 若另考虑生产成本的条件下则更具经济实用性^[62]。在实际生产阶段, 3D 打印技术的优势主要体现在无须模板及减少劳动工时的生产特点上, 而在其他工艺方面

(尤其是如进一步考虑泵送及养护措施)则会产生比传统浇筑更大的碳排放问题, 因而其在生产阶段的技术优势相对较小。为充分发展与推广 3D 打印混凝土技术, 应进一步地优化生产工艺、提高生产效率, 并充分发挥其在异形结构无模化施工中的应用优势, 以为我国建筑自动化发展及减碳事业做出贡献。

4 结论

1) 在粗骨料连续级配的设计下, 含粗骨料 3D 打印混凝土水泥浆体与骨料的质量比越低, 3D 打印时的最大可打印高度可得到提升, 但也将降低多层结构外表面的质量, 而对于力学性能的提升与干燥收缩的抑制作用也将更加显著。

2) 在粗骨料间断级配的设计下, 含粗骨料 3D 打印混凝土内大粒径粗骨料颗粒所占比例越高, 进行打印时的难度随之提升, 不利于其外观与最大建造高度, 并且会削弱相应的力学性能, 但在控制 3D 打印混凝土干燥收缩的方面具有潜在的应用潜力。

3) 含粗骨料 3D 打印混凝土在原材料生产与运输阶段总碳排放较 3D 打印砂浆材料更具有减排优势, 但仍需继续尝试降低配合比中的水泥用量并尽可能控制所添加材料的种类, 否则将会在材料运输阶段造成更大的碳排放问题。对于 3D 打印混凝土技术, 其较传统浇筑的减碳优势主要依赖于无模化施工与节约劳动力特点之上, 否则可能产生较传统浇筑工艺更高的碳排放量。

参考文献:

- [1] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1–15.
HU Angang. J Beijing Univ Technol Soc: Sci Ed(in Chinese), 2021, 21(3): 1–15.
- [2] 缪昌文, 穆松. “双碳”目标下水泥基材料绿色低碳路径思考与展望[J]. 未来城市设计与运营, 2022(2): 10–16.
MIAO Changwen, MU Song. Future City Stud(in Chinese), 2022(2): 10–16.
- [3] 中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专业委员会, 2022中国建筑能耗与碳排放研究报告[EB/OL]. (2022–12–28).
- [4] 孙晓燕, 叶柏兴, 王海龙, 等. 3D打印混凝土材料与结构增强技术研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(5): 878–886.
SUN Xiaoyan, YE Boxing, WANG Hailong, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(5): 878–886.
- [5] HOU S D, DUAN Z H, XIAO J Z, et al. A review of 3D printed concrete: performance requirements, testing measurements and mix design[J]. Constr Build Mater, 2021, 273: 121745.
- [6] KHAN M S, SANCHEZ F, ZHOU H Y. 3-D printing of concrete: beyond horizons[J]. Cem Concr Res, 2020, 133: 106070.
- [7] 王海龙, 陈杰, 高超, 等. 水泥基材料3D打印技术研究进展[J]. 中国建材科技, 2021, 30(3): 2–7.
WANG Hailong, CHEN Jie, GAO Chao, et al. China Build Mater Sci Technol(in Chinese), 2021, 30(3): 2–7.
- [8] ROLLAKANTI C R, PRASAD C V S R. Applications, performance, challenges and current progress of 3D concrete printing technologies as the future of sustainable construction—A state of the art review[J]. Mater Today Proc, 2022, 65: 995–1000.
- [9] MOHAN M K, RAHUL A V, DE SCHUTTER G, et al. Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: a state-of-the-art review[J]. Cem Concr Compos, 2021, 115: 103855.
- [10] SALET T A M, AHMED Z Y, BOS F P, et al. Design of a 3D printed concrete bridge by testing[J]. Virtual Phys Prototyp, 2018, 13(3): 222–236.
- [11] 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.
- [12] World's First 3D-Printed Office Building Unveiled in Dubai. [EB/OL]. (2016–05–26) [2023–02–07]. <https://weburbanist.com/2016/05/26/worlds-first-3d-printed-office-building-unveiled-in-dubai/>.
- [13] The First Fabricated 3D Printing Bus Stop Appeared in Nanjing Jiangbei New Area. [EB/OL]. (2019–01–22) [2023–02–07]. <http://www.nanjingiam.com/cases.html?id=21>.
- [14] Chinese Construction Company 3D Prints an Entire Two-Story House On-Site in 45 Days. [EB/OL]. (2016–06–16) [2022–04–07]. <https://3dprint.com/138664/haushang-tengda-3d-print-house/>.
- [15] MOHAN M K, RAHUL A V, VAN TITTELBOOM K, et al. Rheological and pumping behaviour of 3D printable cementitious materials with varying aggregate content[J]. Cem Concr Res, 2021, 139: 106258.
- [16] DE SCHUTTER G, LESAGE K, MECHTCHERINE V, et al. Vision of 3D printing with concrete—Technical, economic and environmental potentials[J]. Cem Concr Res, 2018, 112: 25–36.
- [17] LIU H W, LIU C, WU Y W, et al. Hardened properties of 3D printed concrete with recycled coarse aggregate[J]. Cem Concr Res, 2022, 159: 106868.
- [18] RAHUL A V, SANTHANAM M. Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates[J]. Cem Concr Compos, 2020, 109: 103570.
- [19] JI G C, DING T, XIAO J Z, et al. A 3D printed ready-mixed concrete power distribution substation: materials and construction technology[J]. Materials (Basel), 2019, 12(9): 1540.
- [20] JI G C, XIAO J Z, ZHI P, et al. Effects of extrusion parameters on properties of 3D printing concrete with coarse aggregates[J]. Constr Build Mater, 2022, 325: 126740.
- [21] RUSHING T S, STYNOSKI P B, BARNA L A, et al. Investigation of concrete mixtures for additive construction[M]//3D Concrete Printing Technology. Amsterdam: Elsevier, 2019: 137–160.
- [22] CHEN Y D, ZHANG Y S, PANG B, et al. Extrusion-based 3D printing concrete with coarse aggregate: Printability and direction-dependent mechanical performance[J]. Constr Build Mater, 2021, 296: 123624.
- [23] MUTHUKRISHNAN S, RAMAKRISHNAN S, SANJAYAN J. Technologies for improving buildability in 3D concrete printing[J]. Cem Concr Compos, 2021, 122(8): 104144.
- [24] CHU S H. Effect of paste volume on fresh and hardened properties of concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 218: 284–294.
- [25] 焦登武, 安晓鹏, 史才军, 等. 骨料裹浆厚度对混凝土流变性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(9): 1360–1366.
JIAO Tengwu, An Xiaopeng, SHI Caijun, et al. J Chin Ceram Soc, 2017, 45(9): 1360–1366.
- [26] KWAN A K H, LI L G. Combined effects of water film, paste film and mortar film thicknesses on fresh properties of concrete[J]. Constr Build Mater, 2014, 50: 598–608.
- [27] DING T, XIAO J Z, ZOU S, et al. Anisotropic behavior in bending of 3D printed concrete reinforced with fibers[J]. Compos Struct, 2020, 254: 112808.
- [28] TORRADO A R, ROBERSON D A. Failure analysis and anisotropy evaluation of 3D-printed tensile test specimens of different geometries and print raster patterns[J]. J Fail Anal Prev, 2016, 16(1): 154–164.
- [29] XIAO J Z, LIU H R, DING T. Finite element analysis on the anisotropic behavior of 3D printed concrete under compression and flexure[J]. Addit Manuf, 2021, 39: 101712.
- [30] YE J H, CUI C, YU J T, et al. Fresh and anisotropic-mechanical properties of 3D printable ultra-high ductile concrete with crumb rubber[J]. Compos B Eng, 2021, 211: 108639.
- [31] MEHTA P K, MONTEIRO P J M. Concrete: microstructure, properties, and materials[M]. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [32] JIAO D W, SHI C J, YUAN Q, et al. Mixture design of concrete using simplex centroid design method[J]. Cem Concr Compos, 2018, 89: 76–88.
- [33] MOUTASSEM F, CHIDIAC S E. Assessment of concrete compressive strength prediction models[J]. KSCE J Civ Eng, 2016, 20(1): 343–358.
- [34] BEUSHAUSEN H, DITTMER T. The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete[J]. Constr Build Mater, 2015, 74: 132–139.
- [35] LIU H W, LIU C, WU Y W, et al. 3D printing concrete with recycled coarse aggregates: the influence of pore structure on interlayer adhesion[J]. Cem Concr Compos, 2022, 134: 104742.
- [36] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [37] RAHUL A V, MOHAN M K, DE SCHUTTER G, et al. 3D printable

- concrete with natural and recycled coarse aggregates: Rheological, mechanical and shrinkage behaviour[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 125: 104311.
- [38] SLAVCHEVA G. Drying and shrinkage of cement paste for 3D printable concrete[J]. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 2019, 481: 012043.
- [39] ZHANG Y, ZHANG Y S, YANG L, et al. Hardened properties and durability of large-scale 3D printed cement-based materials[J]. *Mater Struct*, 2021, 54(1): 1–14.
- [40] CHEN Y, WEI J X, HUANG H L, et al. Application of 3D-DIC to characterize the effect of aggregate size and volume on non-uniform shrinkage strain distribution in concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2018, 86: 178–189.
- [41] FUJIWARA T. Effect of aggregate on drying shrinkage of concrete[J]. *J Adv Concr Technol*, 2008, 6(1): 31–44.
- [42] DELATTE N J. Failure, distress and repair of concrete structures[M]. Oxford: Woodhead Publishing, 2009.
- [43] 黄维蓉, 杨玉柱, 崔通, 等. 含粗骨料超高性能混凝土收缩变形性能的研究[J]. *混凝土*, 2021(8): 99–103.
HUANG Weirong, YANG Yuzhu, CUI Tong, et al. Concrete(in Chinese), 2021(8): 99–103.
- [44] LU K, JIANG X Y, TAM V W Y, et al. Development of a carbon emissions analysis framework using building information modeling and life cycle assessment for the construction of hospital projects[J]. *Sustainability*, 2019, 11(22): 6274.
- [45] 贾铨修. 基于生命周期评价的3D打印建筑结构碳排放量化分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
JIA Chengxiu. Carbon emission analysis of 3D printed building structure based on life cycle assessment(dissertation, in Chinese). Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [46] 张孝存. 建筑碳排放量化分析计算与低碳建筑结构评价方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
ZHANG Xiaocun. Analysis and calculation of building carbon emissions and research on evaluation method of low-carbon building structure(dissertation, in Chinese). Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [47] 仓玉洁. 建筑物化阶段碳排放核算方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
CANG Yujie. Research on carbon emission accounting method in building stage(dissertation, in Chinese). Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [48] 中国能源发展战略与政策研究课题组. 中国能源发展战略与政策研究[M]. 北京: 经济科学出版社, 2004: 63–66.
- [49] 国家发展改革委办公厅, 重点行业企业温室气体排放核算方法与报告指南[R]. 《工业其他行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》, 发改办气候(2015)1722号, 北京: 国家发展改革委办公厅, 2015: 26–27.
- [50] GITARSKIY M L. The refinement to the 2006 ipcc guidelines for national greenhouse gas inventories[J]. *Fundam Appl Climatol*, 2019, 2: 5–13.
- [51] DOE. Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories[M]. DOE/EIA, 2021.
- [52] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Japan: the Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.
- [53] 杨利香, 施钟毅. “十一五”我国粉煤灰综合利用成效及其未来技术方向和发展趋势[J]. *粉煤灰*, 2012, 24(4): 4–9.
YANG Lixiang, SHI Zhongyi. Coal Ash(in Chinese), 2012, 24(4): 4–9.
- [54] XIAO J Z, ZHANG H H, TANG Y X, et al. Fully utilizing carbonated recycled aggregates in concrete: strength, drying shrinkage and carbon emissions analysis[J]. *J Clean Prod*, 2022, 377: 134520.
- [55] SAHRAEI MOGHADAM A, OMIDINASAB F, MOAZAMI GOODARZI S. Characterization of concrete containing RCA and GGBFS: mechanical, microstructural and environmental properties[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 289: 123134.
- [56] XIAO J Z, LV Z Y, DUAN Z H, et al. Study on preparation and mechanical properties of 3D printed concrete with different aggregate combinations[J]. *J Build Eng*, 2022, 51: 104282.
- [57] 李立权. 混凝土配合比设计手册[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002.
- [58] DING T, XIAO J Z, ZOU S, et al. Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand[J]. *Cem Concr Compos*, 2020, 113: 103724.
- [59] 张宇. 3D打印水泥基材料的设计、制备与性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
ZHANG Yu. Design, preparation and properties of 3D printing cement-based materials(dissertation, in Chinese). Nanjing: Southeast University, 2021.
- [60] HERAS MURCIA D, GENEDY M, REDA TAHA M M. Examining the significance of infill printing pattern on the anisotropy of 3D printed concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 262: 120559.
- [61] 焦双健, 杜群乐, 侯程程, 等. 一种全寿命周期公路碳计量方法及其应用[P]. CN Patent, CN102567619A. 2012–07–11.
- [62] BOS F P, MENNA C, PRADENA M, et al. The realities of additively manufactured concrete structures in practice[J]. *Cem Concr Res*, 2022, 156: 106746.

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※



张云升, 兰州理工大学教授, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 2004年毕业于东南大学结构工程系。任江苏省现代混凝土耐久性评估与提升工程技术研究中心副主任, 城市与建筑遗产保护教育部重点实验室副主任。主要研究领域有结构混凝土耐久性, 超高性能混凝土, 绿色低碳建筑, 智能建造, 机制砂混凝土等。其先后主持和承担了国家重点研发计划课题、国家973计划课题和国家自然科学基金等国家和省部级科研项目30余项, 发表学术论文200多篇, 获国家科技进步一等奖1项, 国家科技进步二等奖2项。