

材料组成对 3D 打印水泥基材料早龄期收缩的影响

郝鹏宇, 王振地, 王 玲

(中国建筑材料科学研究总院有限公司, 绿色建筑材料国家重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 由于胶凝材料用量大、通常不使用粗骨料、缺乏模板保护且打印后立即暴露等原因, 3D 打印水泥基材料(3DPC)的收缩问题值得系统研究。为掌握典型材料组成对 3DPC 收缩的影响规律, 采用接触式收缩测试方法, 研究了水胶比、砂胶比、粉煤灰及矿渣粉掺量对 3DPC 总收缩、自收缩及干燥收缩的影响, 基于灰色关联分析计算了材料组成对 3DPC 收缩的影响程度, 对比分析了现有砂浆体系的收缩特性。结果发现增大 3DPC 的水胶比降低自收缩的作用大于干燥收缩。在 3 d 龄期后的干燥收缩随砂掺量的增加而减小。掺入粉煤灰可同比例地降低 3DPC 的 14 d 自收缩和干燥收缩, 而掺入矿渣粉会增大 2 d 后的自收缩和 5 d 前的干燥收缩。材料组成影响 3DPC 收缩的权重从大到小为: 水胶比、砂胶比、矿渣粉掺量、粉煤灰掺量。通过综合对比给出了 3DPC、超高性能混凝土和浇筑砂浆的收缩当量, 建议对 3DPC 的收缩研究予以重视。

关键词: 3D 打印; 水泥基材料; 自收缩; 干燥收缩; 灰色关联分析

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)01-0084-11

网络出版时间: 2024-11-20



水泥基材料 3D 打印工艺是一种通过逐层累加材料的方式快速制造物体的新技术。它融合了数字设计、信息工程、机械设计和材料科学等诸多学科, 迅速成为当前国内外研究的热点^[1]。水泥基材料 3D 打印包含挤出式、粉末床式和喷射式等多种成型方法, 其中, 挤出式 3D 打印因具有现场施工方便, 适宜于打印大型结构等优点, 是当前研究最多的主流技术^[2-3]。有研究表明, 相比传统浇筑建造方法, 水泥基材料 3D 打印可减少 30%~60% 的建筑垃圾, 50%~80% 的人工成本和 50%~70% 的生产时间^[4-5], 且具有无需模板、高自由度及自动施工等特点, 因此被视为引领未来建筑产业发展的重要技术^[6-7]。

为满足挤出式成型工艺的可打印性和可建造性等要求, 3D 打印水泥基材料(3D printed cement-based materials, 3DPC)通常具有胶凝材料用量大、水胶比低, 难以使用粗骨料的特点, 且随着打印过程进行, 3D 打印结构同步暴露于环境中, 水分散失多, 大型打印结构早期养护困难, 因此引起了人们对 3DPC 收缩和服役过程中变形开裂的担忧^[8]。Markin 等^[9]报道了欧洲的 3D 打印建筑结构大规模

开裂的现象, Moelich 等^[10]也注意到了实验室 3D 打印构件因收缩导致的早期开裂现象。

可见 3DPC 由于材料组成、养护条件等原因, 早期更易产生收缩。而结构一旦因收缩出现开裂现象, 不仅影响美观, 还可能为有害介质侵入内部提供便捷通道, 降低服役性能和耐久性, 影响整体结构安全性^[11], 因此应当直面 3DPC 的收缩问题并予以重视。

然而, 目前许多研究集中在 3DPC 的早期流变行为或力学性能上^[12-16], 忽视了 3DPC 的收缩开裂问题。Shahmirzadi 等^[17]研究发现温湿度条件会显著影响 3DPC 的收缩, 温度为 35 °C 时, 相对湿度从 85% 下降到 50% 会使 3DPC 的干燥收缩增大至原先的 3.5 倍。Zhu 等^[18]指出 3D 打印试件的分层结构对收缩具有不利影响, 层间区域的弱粘接导致 3DPC 的收缩增大。Shi 等^[19]总结了 3DPC 在水平和垂直方向上的早期不均匀收缩特征, 提出 3DPC 存在沿高度方向的梯度收缩。但从最基本的材料组成角度出发系统阐明 3DPC 收缩规律的工作尚未见报道。采用本工作提出的接触式 3D 打印水泥基材料收缩

收稿日期: 2024-06-05。 修订日期: 2024-07-10。

基金项目: 中国建材集团原创技术策源地项目(2021YCJS01-2-1); 吴中伟青年科技奖项目(ZA-100)。

第一作者: 郝鹏宇(1999—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 王振地(1984—), 男, 博士, 教授级高级工程师。

Received date: 2024-06-05. Revised date: 2024-07-10.

First author: HAO Pengyu (1999—), male, Master candidate.

E-mail: hpyhpy1999@163.com

Correspondent author: WANG Zhendi (1984—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: wzhenidi@163.com

测试方法，从用水量、细骨料和胶凝材料比例、典型辅助性胶凝材料品种及用量等方面揭示了核心材料组成对 3DPC 总收缩、自收缩及干燥收缩的影响，并深入讨论了材料组成对 3DPC 收缩的影响权重，比较了 3DPC 与其他水泥基材料的收缩特性，可为 3DPC 的组成设计和长期服役提供参考依据。

1 实验

1.1 原材料

采用 P·I 42.5 硅酸盐水泥，以消除水泥中混合材掺量不明对 3DPC 收缩研究的影响，水泥的化学分析及矿物组成结果见表 1，物理性能见表 2。选用 2 种典型的辅助性胶凝材料作为掺合料，一种是 II 级粉煤灰，细度(45 μm 方孔筛筛余)≤12.8%，特点为早期基本不参与水化，后期能够二次水化；另一种是 S95 级矿渣粉，比表面积为 449 m²/kg，7 d 活性

指数≥91%，具有较高的早期水化活性。骨料采用细度模数为 3.7 的天然河砂。水为自来水。使用的 3 种外加剂分别为：速凝剂、减水剂和增稠剂，其中速凝剂为 782-3 型粉状碱性铝酸盐速凝剂，细度(80 μm 方孔筛筛余)≤12%；减水剂为聚羧酸系高性能减水剂，含固量 40%，减水率 33%；增稠剂为羟丙基甲基纤维素(HPMC)，2%水溶液黏度为 150 Pa·s。

1.2 试件制备

3DPC 采用的配合比如表 3 所示，其中胶凝材料总质量为 1，其他材料均为相对于胶凝材料总质量的比例。为满足工作性能要求，3DPC 须具备一定的可挤出性和建造性，经试验验证，当水胶比小于 0.28 时，新拌浆体过于黏稠，无法连续挤出；当水胶比大于 0.32 时，新拌浆体的流动性过强，无法满足建造性要求，因此，水胶比范围选择在 0.28 到 0.32 之间。

表 1 P·I 42.5 硅酸盐水泥化学组成及熟料矿物组成
Table 1 Chemical composition of P·I 42.5 cement and mineral composition of its clinker

Chemical composition								Mineral composition			
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ Oeq	f-Cao	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
20.94	4.31	3.28	63.46	2.76	2.23	0.56	0.80	59.83	16.69	6.41	10.49

w is mass fraction.

表 2 P·I 42.5 硅酸盐水泥物理性能
Table 2 Physical properties of P·I 42.5 cement

Fineness (80 μm sieve)/%	Density/ (g·cm ⁻³)	Specific surface/ (m ² ·kg ⁻¹)	Standard consistency/%	Setting time/min		Flexural strength/MPa		Compressive strength/MPa	
				Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
1.2	3.16	358	26.60	142	206	5.4	8.3	29.7	51.0

表 3 3DPC 的配合比
Table 3 Mixture composition of 3D printed cement-based materials (3DPC)

Group	Water	Cement	Fly ash	Ground granulated blastfurnace slag	Sand	Flash setting admixture	Superplasticizer	Viscosity enhancing agent
W28	28	100	0	0	20	3	0.2	0.2
W30	30	100	0	0	20	3	0.2	0.2
W32	32	100	0	0	20	3	0.2	0.2
FA0	30	100	0	0	20	3	0.2	0.2
FA10	30	90	10	0	20	3	0.2	0.2
FA20	30	80	20	0	20	3	0.2	0.2
FA30	30	70	30	0	20	3	0.2	0.2
GGBS0	30	100	0	0	20	3	0.2	0.2
GGBS10	30	90	0	10	20	3	0.2	0.2
GGBS20	30	80	0	20	20	3	0.2	0.2
GGBS30	30	70	0	30	20	3	0.2	0.2
S0	30	100	0	0	0	3	0.2	0.2
S20	30	100	0	0	20	3	0.2	0.2
S40	30	100	0	0	40	3	0.2	0.2
S60	30	100	0	0	60	3	0.2	0.2

开始打印前需按照 ASTM C1698 标准方法测试表 3 中各配合比的终凝时间, 然后再按照表 3 的配合比称量、搅拌获得打印用砂浆, 将搅拌好的砂浆加入中国建材总院自研的龙门架式水泥基材料 3D 打印机(见图 1)的储料仓内。在环境温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度 $\geq 50\%$ 的打印室内, 按照如图 3 所示的环形路径以 30 mm/s 的打印速率匀速打印, 打印条宽度为 40 mm。完成一圈打印后, 打印喷头回到起始点, 抬升 10 mm 并继续沿相同路径打印, 如此循环, 直到打印 4 层后停止, 得到尺寸为 600 mm $\times$ 100 mm $\times$ 40 mm 的矩形结构, 注意及时用塑料薄膜覆盖以减少水分散失。在终凝前 1 h 内, 先去除矩形结构端头 60 mm, 沿图 2 所示的红线虚线切割, 得到 6 个尺寸为 160 mm $\times$ 40 mm $\times$ 40 mm 的试件, 如图 3a 所示。

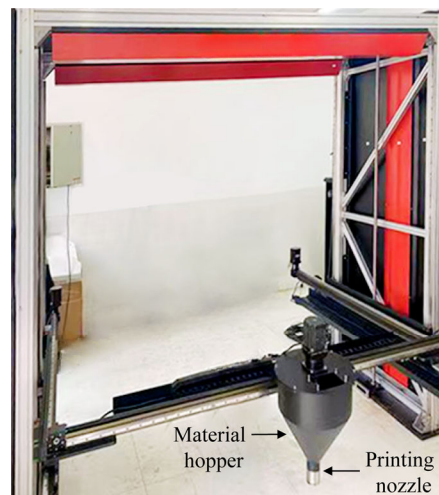


图 1 龙门架式水泥基材料 3D 打印机
Fig. 1 Gantry cement-based 3D printer

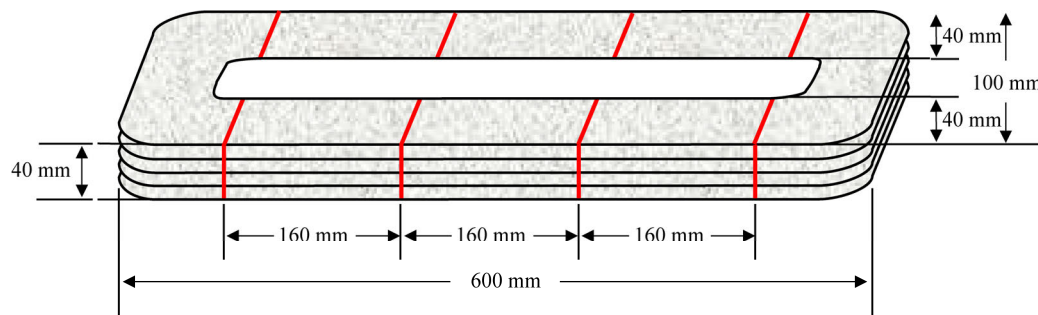
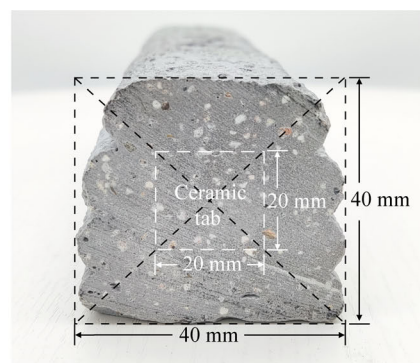


图 2 打印路径及切割方式示意图
Fig. 2 Schematic diagram of printing path and sampling



(a) Front surface



(b) End surface

图 3 切割后得到的 3DPC 试件
Fig. 3 3DPC specimen obtained after cutting

1.3 收缩试验方法

将切割后的试件移入环境温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $60\% \pm 5\%$ 的实验室内。在试件一端中心处使用 502 胶(主要成分为氰基丙烯酸乙酯)粘贴长度和宽度均为 20 mm、厚度为 0.5 mm 的陶瓷片, 如图 3b 所示, 并使用游标卡尺测量试件的初始长度 l_0 。将 6 个试件平均分为 2 组。第 1 组用塑料薄膜包裹

并用铝箔胶带密封, 用于测试自收缩(Autogenous shrinkage, AS); 第 2 组未包裹, 用于测试总收缩(Total shrinkage, TS)。

将试件按图 4 所示垂直放置在收缩测试装置上, 粘贴陶瓷片的一端向上。装置所用千分表由东莞市特马电子有限公司生产, 型号为 IDA910, 最大量程 12.7 mm, 测量精度 1 μm 。调整试件位置使千

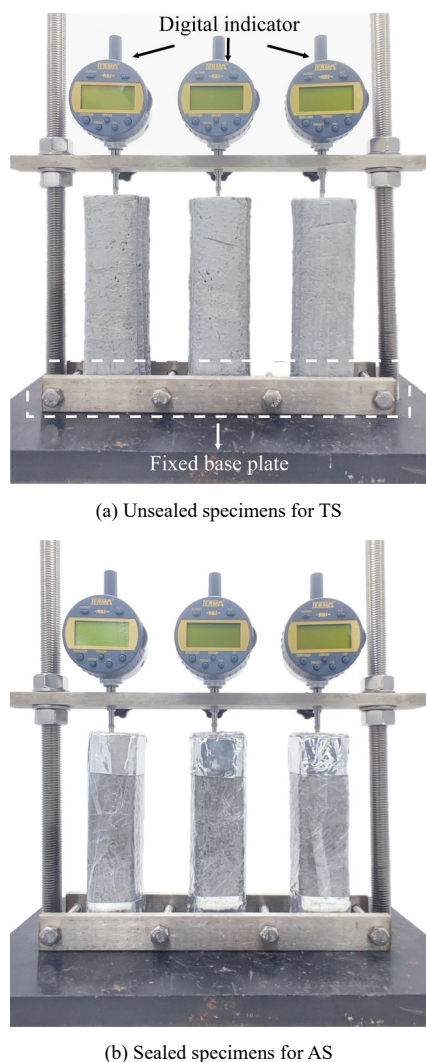


图 4 收缩变形测试装置

Fig. 4 Apparatus for shrinkage deformation measurement

分表测针置于陶瓷片上, 随后锁紧固定脚板, 等到试件终凝时将千分表的示数清零并开始收缩测试, 终凝时间即为收缩测试起点。收缩测试持续 14 d, 每隔 12 h 记录 1 次千分表数据。总收缩与自收缩的值分别按式(1)、式(2)计算, 并以每组 3 个试件收缩应变的平均值作为该组的收缩应变值。干燥收缩 (Drying shrinkage, DS) 是指 3DPC 在空气中失水导致的收缩, 其值按式(3)计算。

$$\varepsilon_{TS} = 10^6 \times \frac{\Delta l_{TS}}{l_{0,TS}} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{AS} = 10^6 \times \frac{\Delta l_{AS}}{l_{0,AS}} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{DS} = \varepsilon_{TS} - \varepsilon_{AS} \quad (3)$$

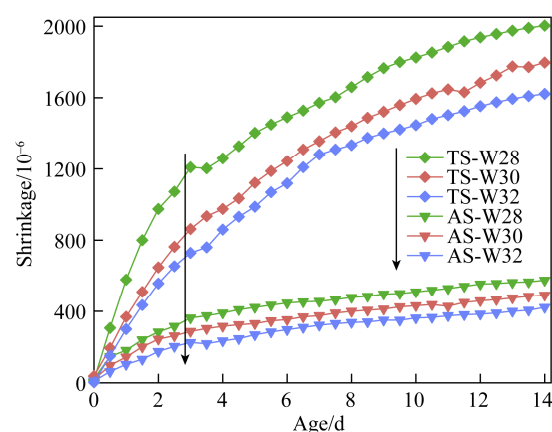
式中: ε_{TS} 为总收缩应变值; Δl_{TS} 为未包裹试件的变形长度, mm; $l_{0,TS}$ 为未包裹试件的初始长度, mm; ε_{AS} 为自收缩应变值; Δl_{AS} 为包裹试件的变形长度,

mm; $l_{0,AS}$ 为包裹试件的初始长度, mm; ε_{DS} 为干燥收缩应变值。

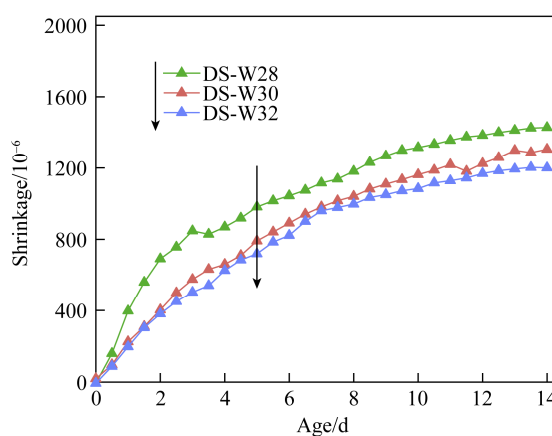
2 结果与分析

2.1 水胶比对 3DPC 收缩的影响

图 5 为水胶比(W/B)对 3DPC 收缩性能的影响。在水化 3 d 内 3DPC 的总收缩、自收缩和干燥收缩均快速增大, 3 d 后 3 种收缩的增加率变小, 收缩曲线逐渐平缓, 这主要是由于 3DPC 早期水化速率快, 产生了较大的自收缩导致的。随着 W/B 增大, 3DPC 的各类收缩均逐渐减小, 但值得注意的是, 与 W28 (W/B=0.28)对比, W30 (W/B=0.30)的 14 d 总收缩、自收缩和干燥收缩分别减小 10.3%、14.6%与 8.5%; 与 W30 对比, W32 (W/B=0.32)的 14 d 总收缩、自收缩和干燥收缩减小 9.7%、14.0%和 8.1%。可见每增加 0.02 的水胶比, 获得的收缩下降速率是减少的, 也即增加用水量对收缩的抑制作用逐渐减弱。此外, 用水量发生变化时, 对 3DPC 的自收缩影响大于干燥收缩。这主要是由于增大 W/B 导致体系中水分含



(a) Total shrinkage (TS) & autogenous shrinkage (AS)



(b) Drying shrinkage (DS)

图 5 W/B 对 3DPC 收缩的影响

Fig. 5 Influence of W/B on shrinkage of 3DPC

量增加,本质上增大了水泥颗粒之间的距离,使水泥浆体中的毛细孔径增大从而降低自收缩^[20–22],同时,胶凝材料占比相对减小,也降低了水化反应消耗水的速率,因此对自收缩的降低效果大于干燥收缩。

图6为不同龄期时自收缩和干燥收缩对总收缩的贡献比例。起初自收缩占比较高,随龄期增长,自收缩的占比逐渐减小,这与图5中自收缩收缩曲线增长速率的变化是一致的。以W30为例,0.5 d时自收缩与干燥收缩对总收缩的贡献比例均为50%,1 d时自收缩占比降低至39%,7 d时自收缩占比降低至28%并在此后基本保持稳定,证明3DPC在早龄期时水化速率快,自身变形大。其余2组不同水胶比试件的自收缩与干燥收缩之比演变规律与W30相似,14 d时自收缩与干燥收缩对总收缩的贡献比例接近3:7。

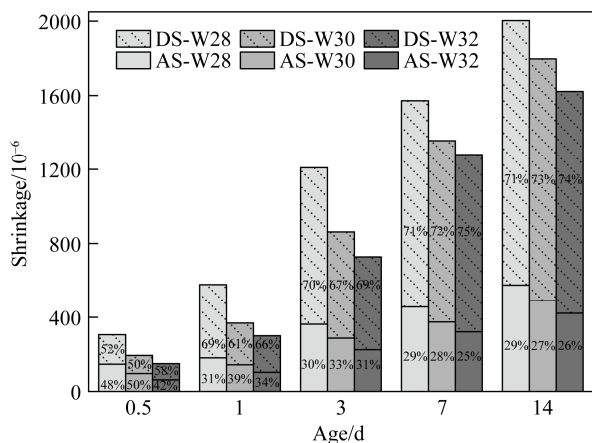


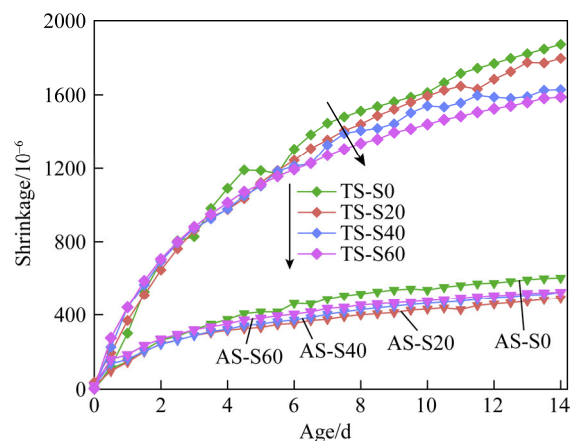
图6 不同W/B不同龄期3DPC的自收缩与干燥收缩在总收缩中的占比

Fig. 6 Proportions of AS and DS in TS for 3DPC with different W/B and ages

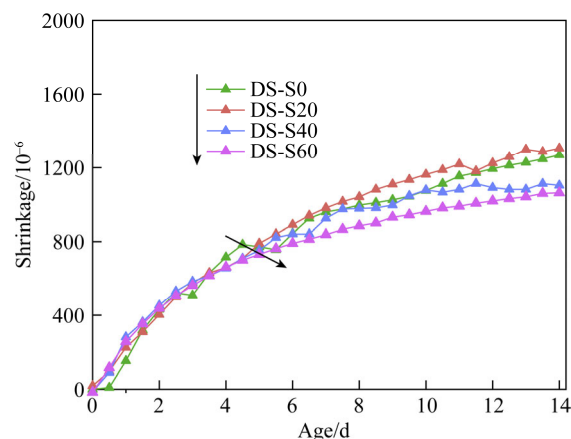
2.2 砂胶比对3DPC收缩的影响

图7为砂胶比(S/B)对3DPC收缩性能的影响。从图7a可以看出,3DPC的总收缩随着河砂用量的增加(从0到60%)而减小,表明河砂的掺入能够很好地抑制3DPC的总收缩,这与常规水泥基材料的体积稳定性规律一致。此外,14 d时S20、S40与S60的自收缩基本一致,表明3DPC的自收缩主要由胶凝材料用量控制,当胶凝材料用量一定时,继续增加砂的用量对自收缩的降低作用非常有限。结合图7b可以发现,加入砂抑制干燥收缩效果更明显,14 d时掺入60%砂的3DPC干燥收缩相比净浆减小15.8%。各组3DPC干燥收缩的差距在3 d后才

逐渐显现,这可能是由于早期3DPC内部的水分被水化消耗,大约在3 d左右,3DPC内部水分向外迁移速度降低,与表面水分蒸发速度的平衡被打破,使干燥收缩增大,这时细骨料对干燥收缩的抑制作用逐渐变得明显。



(a) TS&AS



(b) DS

图7 S/B对3DPC收缩的影响

Fig. 7 Influence of S/B on shrinkage of 3DPC

图8为不同龄期时自收缩与干燥收缩在总收缩中所占的比例。净浆S0在0.5 d时的自收缩占比为92%,显著高于掺入砂的3DPC,但随后自收缩比例迅速降低,至3 d时约占38%,已与掺入砂的3DPC的自收缩占比相近。另外,掺入砂在前3 d并未减小总收缩,反而使总收缩随砂用量的增大而增大,这可能是由于砂的掺入增大了3DPC的表面粗糙度,从而增大了早期干燥收缩导致的。可见掺入砂后在早期需要及时养护,以有效降低3DPC的总收缩。结合图7和图8的分析结果,砂对干燥收缩的抑制效果在3 d后才逐渐显现,随龄期发展和砂掺量的增加而增大。

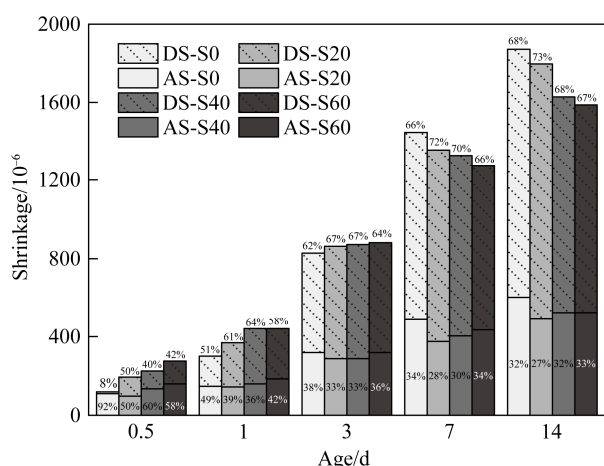


图 8 不同 S/B 不同龄期 3DPC 的自收缩与干燥收缩在总收缩中的占比

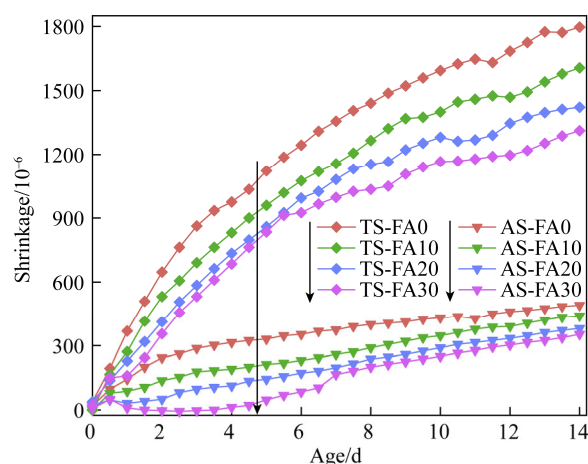
Fig. 8 Proportions of AS and DS in TS for 3DPC with different S/B and ages

2.3 粉煤灰掺量对 3DPC 收缩的影响

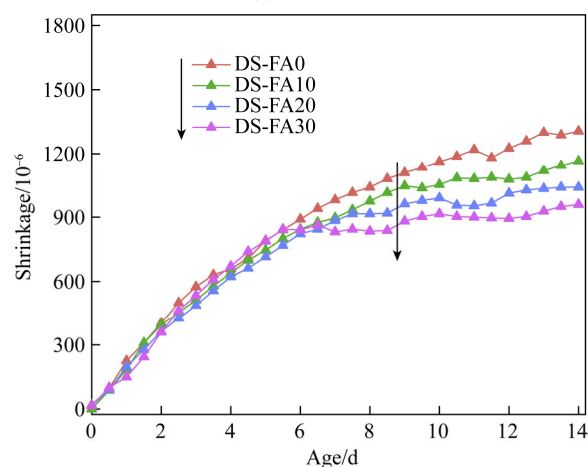
图 9 为使用粉煤灰(Fly ash, FA)取代部分水泥对 3DPC 收缩的影响。从图 9a 可以看出, 在 7 d 前 3DPC 的自收缩随 FA 的掺量增加, 下降非常明显, 例如 FA30 相比 FA0 的自收缩降低了 55.8%。这主要是由于 FA 在早期较少参与水化反应, 加入 FA 减少了水泥用量并降低了水化反应程度, 可见掺入 FA 能很好地抑制 3DPC 的早期自收缩。从图 9b 可以看出, 在 7 d 后, 干燥收缩随 FA 的掺量增加而下降, 这表明 FA 的掺入不仅可以在早期降低自收缩, 还能降低后期的干燥收缩, 因此各龄期的总收缩均随着 FA 掺量的增加而减小。14 d 时, 相比 FA0, FA30 的自收缩和干燥收缩分别减小 28.0%与 26.6%, 即掺入 30%的 FA 对 14 d 自收缩和干燥收缩的减小比例非常接近; 经计算发现其余掺量的 3DPC 亦有类似规律, 进一步证明了掺入 FA 能够同比例地减小 3DPC 的 14 d 自收缩与干燥收缩。图 10 为不同龄期时自收缩与干燥收缩在总收缩中所占的比例。早期自收缩占比随着 FA 掺量的增加迅速降低, 这与图 9 发现的掺入 FA 对 3DPC 早期自收缩的抑制效果相符。而 3 d 后, 掺入 FA 的 3DPC 自收缩占比会逐渐恢复, 至 14 d 自收缩占比提高至 27%, 与 FA0 相同。

2.4 矿渣粉掺量对 3DPC 收缩的影响

图 11 是矿渣粉(Ground granulated blastfurnace slag, GGBS)取代部分水泥对 3DPC 收缩的影响。从图 11a 可以看出, 在 2 d 前 GGBS 对自收缩的影响不明显, 但 2 d 后 3DPC 的自收缩随 GGBS 掺量的



(a) TS&AS



(b) DS

图 9 FA 掺量对 3DPC 收缩的影响

Fig. 9 Influence of FA replacement ratios on shrinkage of 3DPC

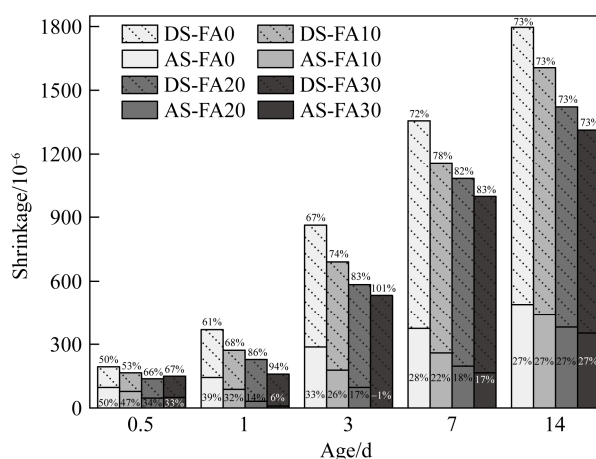


图 10 不同 FA 掺量不同龄期 3DPC 的自收缩与干燥收缩在总收缩中的占比

Fig. 10 Proportions of AS and DS in TS for 3DPC with different fly ash (FA) replacement ratios and ages

增加而增大, GGBS30 的 14 d 自收缩可达 GGBS0 的 196.2%。这主要是由于 GGBS 早期水化活性较高,

参与水化反应导致自收缩增大。结合图 11b 可以发现, 在 5 d 前, 当 GGBS 的掺量超过 10% 后, 干燥收缩随着 GGBS 掺量的增加而增大, 这表明高掺量 GGBS 还会在早期提高 3DPC 的干燥收缩。约 5 d 后, 不同掺量的 GGBS 均降低了 3DPC 的干燥收缩, 14 d 时 GGBS30 的干燥收缩相比 GGBS0 降低 29.9%。3DPC 的总收缩随 GGBS 的掺量增加(从 0 到 30%) 出现先减小后增大的现象。图 12 为不同龄期时自收缩与干燥收缩在总收缩中所占的比例。可以发现, 掺入 GGBS 的 3 组 3DPC 在 1 d 后自收缩占比逐渐增大, 至 14 d 时自收缩占比分别为 45%、49% 与 51%, 显著高于 GGBS0 的自收缩占比(27%)。与掺入 FA 可使 3DPC 的 14 d 自收缩与干燥收缩同比例减小不同, 掺入 GGBS 显著增大了 3DPC 的自收缩, 在 5 d 前使干燥收缩增大而 5 d 后干燥收缩减小。

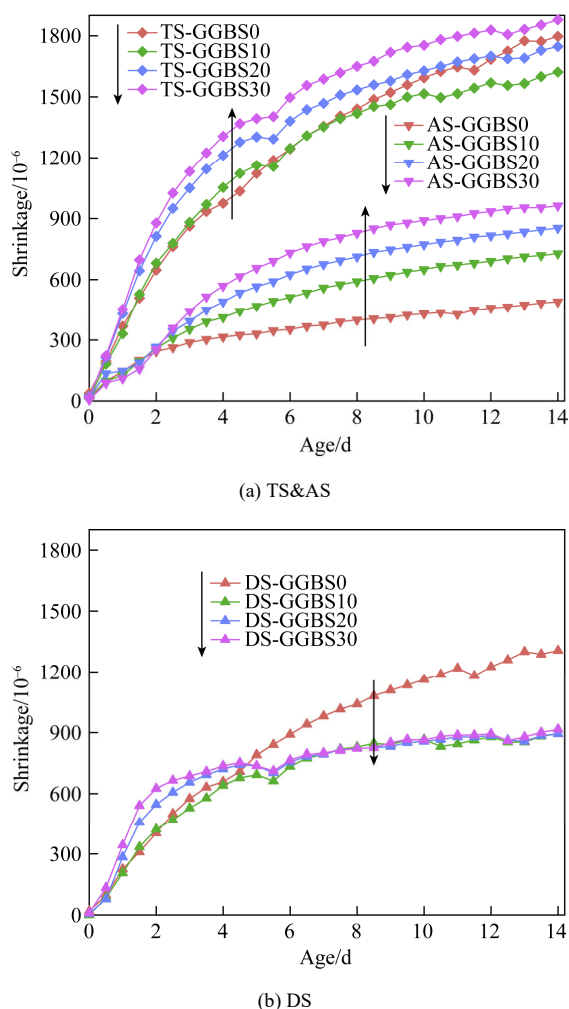


图 11 GGBS 掺量对 3DPC 收缩的影响

Fig. 11 Influence of GGBS replacement ratios on shrinkage of 3DPC

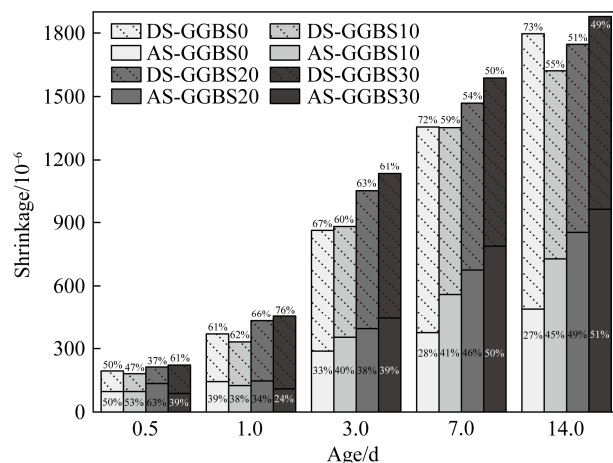


图 12 不同 GGBS 掺量不同龄期 3DPC 的自收缩与干燥收缩在总收缩中的占比

Fig. 12 Proportions of AS and DS in TS for 3DPC with different GGBS replacement ratios and ages

3 讨论

3.1 材料组成与收缩的相关性分析

灰色关联分析(Grey relational analysis, GRA)是一种用于衡量因素间关联程度的数学分析方法,是 Deng^[23]提出的灰色系统理论的重要内容^[24–26]。GRA 方法得到的灰色关联度介于 0 到 1 之间,且越接近于 1 表明目标与影响因素之间的关联程度越高^[27]。为剖析材料组成对 3DPC 收缩的影响程度,以试验测定的总收缩、自收缩与干燥收缩为参考序列,采用 GRA 方法对试验中涉及的 W/B、S/B、FA 及 GGBS 掺量 4 种因素进行分析(本工作取分辨系数 $\rho=0.5$,具体计算过程可参考文献^[27]),得到的灰色关联分析结果如图 13 所示。从图 13 可以看出,4 种因素的灰色关联度均高于 0.75,证明 4 种因素均与 3DPC 的收缩具有高相关度,这与水泥基材料科学中的认识一致。其中, W/B 与 S/B 两种因素的灰色关联度系数均高于 0.9,表明在 3DPC 配合比设计时,水和砂的用量对收缩的影响权重比矿物掺合料更大,其中水的影响又高于砂。由图 13d 可见, FA 掺量与总收缩、自收缩和干燥收缩之间的灰色关联度几乎相等,这与前文提到的 FA 能够同比例减小 3DPC 不同类型收缩的结论是一致的。而 GGBS 掺量对于自收缩的影响程度高于干燥收缩和总收缩,从图 13a~图 13c 的局部放大图像可知, GGBS 与 3 种收缩之间的灰色关联系数均随龄期增长而缓慢减小,这证明 GGBS 与 3DPC 早期收缩的关联程度更高,后期对 3DPC 收缩的影响逐渐减弱,这也与 GGBS 早期活性较高的特性相符。通过图 13d 中的平均灰色关

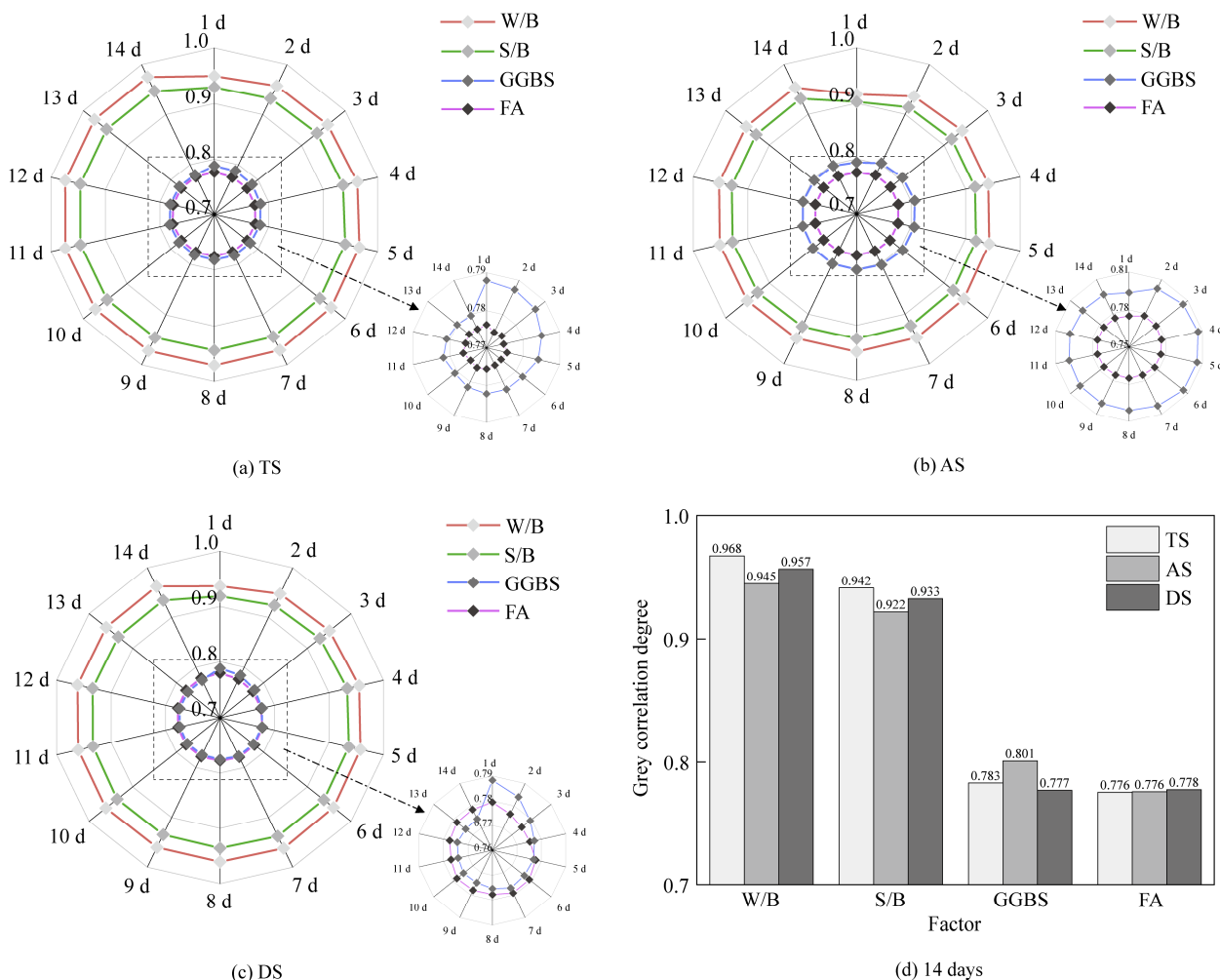


图 13 材料组成与总收缩、自收缩、干燥收缩之间的灰色关联度及 14 d 平均灰色关联度

Fig. 13 Grey correlation degree between each material factor and TS, AS, DS, and the average grey correlation degree of 14 days

联度计算结果,可以得到 4 种因素对 3DPC 收缩的影响程度排序为: W/B、S/B、GGBS、FA。

3.2 3DPC 与典型水泥基材料收缩的比较

由于当前 3DPC 中很少加入粗骨料,因此本质上可以将 3DPC 视为一种特殊类型的砂浆。为对比分析 3DPC 与浇筑成型砂浆、超高性能混凝土(UHPC)等类似材料的收缩规律,呈现出 3DPC 在现有水泥基材料体系中的收缩特征,将试验数据与已有的文献[28–30]数据进行了综合比较,结合不同材料的特点绘制成图 14。其中浇筑砂浆是使用与 3DPC 完全相同的配合比按浇筑方式成型,自加水拌合起 24 h 脱模并以此为收缩测试起点,按本工作所述方法进行收缩测试获得的;典型 UHPC 的收缩数据由文献[29]取得,其配合比如表 4 所示,自加水拌合起 48 h 开始测试收缩。值得注意的是,与 3DPC 不同,浇筑砂浆和 UHPC 均需脱模才能测试收缩,因此 3 种水泥基材料的收缩测试起点并不一致。本工作的意

义在于比较其收缩规律而非具体数值。

对浇筑砂浆而言,干燥收缩仍然是收缩的主要形式,14 d 干燥收缩占比约为 60%,相比 3DPC 的干燥收缩占比 70%有所降低。此外,浇筑砂浆的自收缩略低于 3DPC,但干燥收缩和总收缩与 3DPC 差异明显,原因可能在于浇筑砂浆早期受到模具保护,且经振捣形成的均匀致密结构有助于减小收缩。UHPC 通常具有极低的 W/B 和较高的胶凝材料用量,这导致 UHPC 的自收缩在总收缩中占据主要地位, UHPC 收缩稳定时自收缩占比约为 80%^[29–30],且早期收缩发展快。3DPC 早期收缩发展速率慢于 UHPC,但干燥收缩更大且占比更高,可能是由于 3DPC 相比 UHPC 具有更高的结构表面系数且缺乏骨料合理级配造成的。另外,由于干燥收缩对总收缩的贡献突出,3DPC 的收缩情况相较 UHPC 更为严重,这与 Markin 等^[9]和 Moelich 等^[10]披露的 3D 打印示范工程现场普遍发生开裂的现象是能够相互印证的。

结合现有试验结果与综合分析,认为在现有的水泥基材料体系中,收缩的由大到小排序为 3DPC、UHPC、

浇筑砂浆,通过合理的减缩措施,可以有效减小 3DPC 的收缩,从而降低工程应用中的开裂风险。

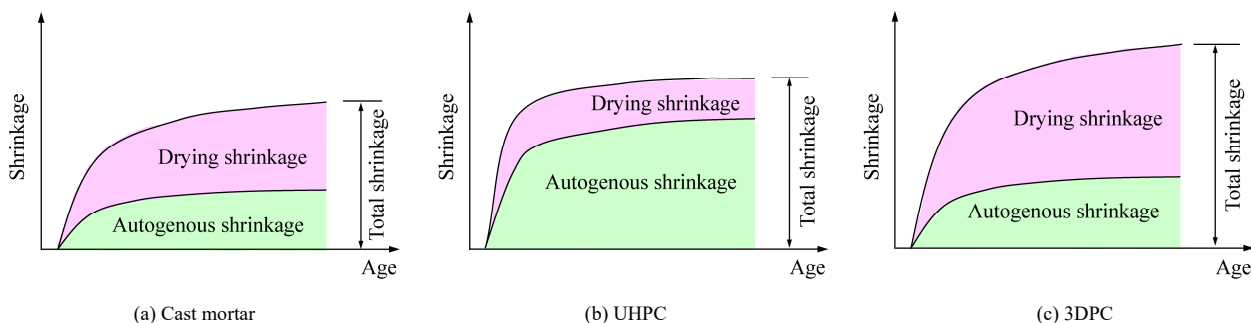


图 14 3 种典型水泥基材料的收缩
Fig. 14 Shrinkage of three typical cement-based materials

表 4 文献[29]中 UHPC 的配合比
Table 4 Mixture composition of UHPC in Ref. [29]

W/B ratio	w/%				
	Cement	Silica fume	Water	Sand	Superplasticizer
0.17	0.85	0.15	0.135	1.00	0.05

4 结论

1) 增大水胶比对 3DPC 的总收缩、自收缩和干燥收缩均有抑制效果,其中对自收缩的降低作用大于干燥收缩,但随水胶比增大,收缩的抑制效果逐渐减弱。3 d 后 3DPC 的干燥收缩随砂掺量的增加而减小,掺入 60%砂可使 3DPC 的 14 d 干燥收缩减小 15.8%。增加砂的用量对自收缩的降低作用有限,证明了 3DPC 自收缩主要由胶凝材料总量控制。

2) 3DPC 的 14 d 自收缩和干燥收缩随着粉煤灰掺量的增加而同比例减小,掺入 30%粉煤灰可使 3DPC 的 14 d 自收缩和干燥收缩分别减小 28.0%与 26.6%。掺入矿渣粉会增大自收缩但减小干燥收缩,掺入 30%矿渣粉可使 3DPC 的 14 d 自收缩增大 96.2%而干燥收缩减小 29.9%。

3) 基于灰色关联分析,材料因素对 3DPC 收缩的影响程度大小为:水胶比、砂胶比、矿渣粉掺量、粉煤灰掺量。在现有水泥基材料体系中,收缩的大小排序为 3DPC、UHPC、浇筑砂浆,应对 3DPC 的减缩研究予以重视。

参考文献:

- LYU F Y, ZHAO D L, HOU X H, et al. Overview of the development of 3D-printing concrete: A review[J]. Appl Sci, 2021, 11(21): 9822.
- 刘致远, 王振地, 王玲, 等. 3D 打印水泥净浆层间拉伸强度及层间剪切强度[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(5): 648–652.
- LIU Zhiyuan, WANG Zhendi, WANG Ling, et al. J Chin Ceram Soc,

2019, 47(5): 648–652.

- CHEN Y, HE S, GAN Y D, et al. A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing[J]. J Build Eng, 2022, 45: 103599.
- ZHANG J C, WANG J L, DONG S F, et al. A review of the current progress and application of 3D printed concrete[J]. Compos Part A Appl Sci Manuf, 2019, 125: 105533.
- 张云升, 陈逸东, 刘诚. 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[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(9): 2153–2165.
- ZHANG Yunsheng, CHEN Yidong, LIU Cheng. Printability, mechanics, shrinkage and carbon emission analysis of 3D printed concrete with coarse aggregates[J]. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(9): 2153–2165.
- PERROT A, RANGEARD D, PIERRE A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques[J]. Mater Struct, 2016, 49(4): 1213–1220.
- MA G W, WANG L. A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing[J]. Front Struct Civ Eng, 2018, 12(3): 382–400.
- NODEHI M, AGUAYO F, NODEHI S E, et al. Durability properties of 3D printed concrete (3DPC)[J]. Autom Constr, 2022, 142: 104479.
- MARKIN S, MECHTCHERINE V. Quantification of plastic shrinkage and plastic shrinkage cracking of the 3D printable concretes using 2D digital image correlation[J]. Cem Concr Compos, 2023, 139: 105050.
- MOELICH G M, KRUGER J, COMBRINCK R. Plastic shrinkage cracking in 3D printed concrete[J]. Compos Part B Eng, 2020, 200: 108313.
- YANG F, ZHOU W, LI F H, et al. Sprayable coating based on fluorinated silica nanocomposites with superhydrophobic and antibacterial properties for advanced concrete[J]. Prog Nat Sci Mater Int, 2022, 32(4): 472–481.
- ZHANG Y, ZHANG Y S, SHE W, et al. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 201: 278–285.
- WANGLER T, ROUSSEL N, BOS F P, et al. Digital concrete: A review[J]. Cem Concr Res, 2019, 123: 105780.
- 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.
- [15] ZHANG Y, ZHANG Y S, LIU G J, et al. Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 174: 263–271.
- [16] 刘致远. 3D 打印水泥基材料流变性能调控及力学性能表征[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2019.
- LIU Zhiyuan. Rheological property control and mechanical properties characterization of 3D printed cement-based materials[D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2019.
- [17] SHAHMIRZADI M R, GHOLAMPOUR A, KASHANI A, et al. Shrinkage behavior of cementitious 3D printing materials: Effect of temperature and relative humidity[J]. *Cem Concr Compos*, 2021, 124: 104238.
- [18] ZHU L L, ZHANG M, ZHANG Y Q, et al. Research progress on shrinkage properties of extruded 3D printed cement-based materials[J]. *J Build Eng*, 2023, 77: 107394.
- [19] SHI Y F, JIA L T, JIA Z J, et al. Early-age inhomogeneous deformation of 3D printed concrete: Characteristics and influences of superplasticizer and water-binder ratio[J]. *J Build Eng*, 2024, 86: 108956.
- [20] 曹秀丽, 张红飞, 董先锋, 等. 高性能混凝土自收缩机理及预测模型的研究进展[J]. *混凝土*, 2012(10): 48–50.
- CAO Xiuli, ZHANG Hongfei, DONG Xianfeng. et al. Review of mechanisms and prediction models of autogenous shrinkage in high performance concrete[J]. *Concrete*, 2012(10): 48–50.
- [21] HUANG L, CHEN Z J, YE H L. A mechanistic model for the time-dependent autogenous shrinkage of high performance concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 255: 119335.
- [22] 韩宇栋, 张君, 岳清瑞, 等. 现代混凝土收缩研究评述[J]. *混凝土*, 2019(2): 1–12.
- HAN Yudong, ZHANG Jun, YUE Qingrui, et al. *Concrete*, 2019(2): 1–12.
- [23] DENG J L. Control problems of grey systems[J]. *Syst Contr Lett*, 1982, 1(5): 288–294.
- [24] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(8): 2041–2046.
- LIU Sifeng, CAI Hua, YANG Yingjie, et al. *Syst Eng Theory Pract*, 2013, 33(8): 2041–2046.
- [25] FU D B, XIA C, XU S, et al. Effect of concrete composition on drying shrinkage behavior of ultra-high performance concrete[J]. *J Build Eng*, 2022, 62: 105333.
- [26] SHEN A Q, LIN S L, GUO Y C, et al. Relationship between flexural strength and pore structure of pavement concrete under fatigue loads and Freeze-thaw interaction in seasonal frozen regions[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 174: 684–692.
- [27] WANG Z J, WANG Q, AI T. Comparative study on effects of binders and curing ages on properties of cement emulsified asphalt mixture using gray correlation entropy analysis[J]. *Constr Build Mater*, 2014, 54: 615–622.
- [28] MA L, JIA Z J, CHEN Y N, et al. Water loss and shrinkage prediction in 3D printed concrete with varying w/c and specimen sizes[J]. *Cem Concr Compos*, 2024, 149: 105523.
- [29] SUN M, VISINTIN P, BENNETT T. The effect of specimen size on autogenous and total shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 327: 126952.
- [30] XIE T, FANG C, MOHAMAD ALI M S, et al. Characterizations of autogenous and drying shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC): An experimental study[J]. *Cem Concr Compos*, 2018, 91: 156–173.

Effect of Material Composition on Early Age Shrinkage of 3D Printed Cement-Based Materials

HAO Pengyu, WANG Zhendi, WANG Ling

(State Key Laboratory of Green Building Materials, China Building Materials Academy, Beijing 100024, China)

Extended Abstract

Introduction The rapid adoption of 3D printed cement-based materials (3DPC) in construction industry, particularly in sustainable buildings, highlights a critical importance of understanding its shrinkage characteristics. Different from conventional concrete, 3DPC is characterized due to the absence of coarse aggregates, the lack of templates support during printing, and immediately exposure to environmental conditions, which make it more susceptible to shrinkage-induced cracking. Shrinkage in cement-based materials leads to internal stresses and potential durability issues, affecting a long-term structural integrity. It is thus to investigate the shrinkage behavior of 3DPC. In particular, the effect of material compositions (*i.e.*, water-binder ratio (W/B), sand-binder ratio (S/B), and supplementary cementitious materials such as fly ash (FA) and ground granulated blast furnace slag (GGBS)) on the shrinkage (total shrinkage, autogenous shrinkage, and drying shrinkage) is not fully clarified. This study was to investigate the shrinkage characteristics of 3DPC and compare it with other cement-based materials (*i.e.*, UHPC and cast mortar).

Methods To investigate the impact of material composition on 3DPC shrinkage, a series of laboratory experiments were conducted by a standardized contact shrinkage testing method. Four key factors evaluated were W/B, S/B, FA replacement ratio, and GGBS replacement ratio. These material variables were selected based on their known influence on the microstructure and shrinkage behavior of traditional cement-based materials.

Total shrinkage (TS), autogenous shrinkage (AS), and drying shrinkage (DS) were measured at specific intervals to capture early-age shrinkage behavior in 14 d. TS was calculated as a sum of AS and DS to represent the overall dimensional changes of the material for over time. The degree of influence of each material factor on the shrinkage was determined by grey relational analysis (GRA). GRA is a statistical method that enables the quantification of the relationship between multiple variables in complex systems,

making it particularly suitable for determining the relative significance of material compositions in the context of 3DPC shrinkage.

For comparative purposes, the shrinkage characteristics of conventional cast mortar and UHPC were also analyzed under identical conditions, enabling a comprehensive evaluation of the shrinkage performance of 3DPC.

Result and discussion The results reveal the distinct shrinkage patterns based on the material composition of 3DPC. Increasing the W/B can significantly reduce AS. However, the influence of W/B on DS is less than that on AS. Also, the S/B has a measurable effect on drying shrinkage. After an initial curing period of 3 d, a higher S/B ratio leads to a marked reduction in DS likely due to the presence of fine sand particles, which restricts the movement of water within the matrix and limit capillary stresses.

Besides, the replacement of cement with FA has a beneficial effect on shrinkage reduction. The 14 d AS and DS both are significantly lower in 30% FA-modified 3DPC, compared to the control sample. Also, the incorporation of FA reduces the 14 d autogenous shrinkage and drying shrinkage of 3DPC in the same proportion. In contrast, the use of GGBS has a more complex influence on shrinkage. While GGBS replacement increases AS after 2 d, it reduced drying shrinkage before 5 d. The TS of 3DPC firstly decreases and then increases with the increase of GGBS dosage, and the TS of 3DPC is the minimum value when the dosage of GGBS is 10%.

The grey relational analysis shows the factors influencing 3DPC shrinkage in an order of significance, *i.e.*, W/B, S/B, GGBS and FA. This highlights a predominant role of water content in governing both autogenous and drying shrinkage in 3DPC systems, which is consistent with those in other cement-based materials. However, the relative importance of sand and supplementary materials indicates that a further optimization of the mix design can lead to an improved shrinkage performance. Comparing the shrinkage behavior of 3DPC with that of UHPC and cast mortar, the shrinkage magnitudes of 3DPC are generally higher. These results indicate a necessity of tailored shrinkage control strategies in 3DPC, especially in large-scale applications where cracking risk is a major concern.

Conclusions This study provided a comprehensive evaluation of the shrinkage behavior of 3D printed cementitious materials, especially the influence of material compositions such as W/B, S/B, FA, and GGBS. Increasing the W/B of 3DPC significantly reduced AS more than DS. The DS decreased with increasing S/B after 3 d. The replacement of FA proportionately decreased the 14 d AS and DS of 3DPC, whereas the replacement of GGBS replacement ratios increased AS after 2 d and DS before 5 d. The influence of material composition on 3DPC shrinkage was ranked in a decreasing order of W/B, S/B, GGBS, and FA. Compared to other cement-based materials like UHPC and cast mortar, 3DPC exhibited a higher shrinkage, indicating the need for more focused research and innovation in shrinkage reduction techniques for 3DPC. These findings contributed to a deeper understanding of the material behavior and provided a foundation for a future work on optimizing 3DPC for large-scale and crack-resistant applications.

Keywords 3D printing; cement-based materials; autogenous shrinkage; drying shrinkage; grey relational analysis