

养护制度对 3D 打印砂浆性能影响及冻融损伤寿命预测

翟文辉¹, 马亚鹏¹, 张东生^{1,2}, 朱 涛¹, 毛明杰¹, 杨秋宁¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021;

2. Department of Civil Engineering, KU Leuven, Campus Bruges, Bruges 8200, Belgium)

摘 要: 鉴于适合 3D 打印水泥基材料的养护制度尚未明晰, 制约其在不同环境下的应用, 本工作系统评价了自然养护(NC)、标准养护(SC)、60 °C 高温养护(T_{60})、饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液养护(SCH)及 SAP 内养护(SAP) 5 种制度对 3D 打印固废-水泥基砂浆(3DFGCM)性能的调控作用。通过综合力学各向异性、冻融损伤演化与孔隙结构分析, 揭示养护制度对于 3DFGCM 性能的作用机理。结果表明, 3D 打印工艺导致定向孔隙与层间弱界面会诱发应力集中, 使 28 d 抗压强度呈现浇注试块(Cast) $>X>Z>Y$, 并显著增加了材料的各向异性; 此外, 养护制度对各向异性系数影响显著, 其调控效果表现为 $\text{SAP}<\text{SC}<\text{SCH}<T_{60}<\text{NC}$; 抗冻性能方面, SAP 组相对动弹性模量保留率达到 61.5%, 相较于 NC 组提高了 29.6%, 展现出最优的冻融损伤抑制效果。基于 Weibull 分布模型构建损伤演化方程, 预测 3D-SAP 在西北寒区服役寿命达 15.9 年, 通过 BP 神经网络建立孔隙结构对极限冻融次数与西北寒区服役寿命的预测模型。为 3D 打印建材养护方式设计与抗冻性优化提供参考。

关键词: 3D 打印; 养护方式; 孔隙结构; 冻融损伤寿命预测; 反向传播神经网络

中图分类号: TU528; TB44 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)05-1611-14

网络出版时间: 2025-09-08



随着“双碳”战略的深入推进, 3D 打印技术具有无模化施工、材料高效利用及复杂构型制造能力, 已成为绿色建筑领域的创新方向^[1-2]。然而, 传统 3D 打印水泥基材料主要依赖于硅酸盐水泥作为胶凝组分, 其生产过程中碳排放量较高(约 0.83 t CO_2/t), 造成的环境问题亟须解决。基于此, 利用工业固废部分替代水泥制备低碳砂浆更契合固废资源化与建筑工业化协同发展的需求^[3-4]。

尽管固废-水泥基砂浆在 3D 打印中展现出生态效益优势, 但其性能调控不完善^[5-9]。朱伶俐等^[10]和 Li 等^[11]对 3D 打印固废基进行配合比的研究, 指出胶砂比、水胶比对 3D 打印砂浆的影响显著。部分学者制备浇筑砂浆过程中发现, 养护方式也是调控材料水化-干燥-收缩动态平衡的关键手段, 对砂浆的性能影响显著^[12-15]。张媛媛等^[16]和 Li 等^[17]发现试样经内养护后对强度与工作性能有效提高, 对收缩开裂、不便进行外养护的部位和结构具有很好的应用价值。Elmasry 等^[18]研究了自然养护、水养

护、覆膜养护、化学养护对于不同水泥掺量的混凝土性能的影响, 研究表明除自然养护外, 其余均对于各项性能有提高, 其中水养护下抗压强度提高最多为 40.4 MPa。现有研究表明, 传统浇筑混凝土的养护方法已形成较为完善的体系, 然而 3D 打印混凝土因其逐层堆积的成型工艺和开放式的蒸发环境, 易导致试件产生层间弱结合界面和定向孔隙结构, 这不仅显著加剧了水分渗透和冻胀应力集中效应, 更严重制约了 3D 打印技术在寒区工程中的推广应用^[19-22]。尽管已有研究证实不同养护方式对性能具有显著影响^[23-25], 但传统浇筑砂浆的养护方法对 3D 打印试件的适用性仍待深入验证。目前, 针对不同养护条件下 3D 打印混凝土抗冻性能的系统研究仍较为匮乏, 且传统 Weibull 模型预测方法依赖于大量阶段性冻融循环试验, 存在试验周期长、变量控制单一等固有局限性。

基于此, 本工作选用自然养护(NC)、标准养护(SC)、高温养护(T_{60})、饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液养护(SCH)

收稿日期: 2025-06-17。 修订日期: 2025-08-21。

基金项目: 国家自然科学基金(52468068); 宁夏自然科学基金重点项目(2024AAC02014)。

第一作者: 翟文辉(2001—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 杨秋宁(1972—), 女, 博士, 教授。

Received date: 2025-06-17. Revised date: 2025-08-21.

First author: ZHAI Wenhui (2001—), male, Master candidate.

E-mail: 1569726892@qq.com

Correspondent author: YANG Qiuning (1972—), female, Ph.D., Professor.

E-mail: yangqn@nxu.edu.cn

及 SAP 内养护(SAP)对 3D 打印固废–水泥基砂浆(3DFGCM)进行养护。研究不同养护方式对 3DFGCM 力学各向异性的影响,以及冻融循环下的质量损失、相对动弹性模量与强度损失的变化规律,通过含气量、弦长与弦长分布等分析孔隙结构,并引用 Weibull 模型进行冻融损伤与寿命预测,最后引入 BP 神经网络算法,以孔隙结构参数作为输入变量,关联 Weibull 模型输出的破坏次数与寿命预测值,构建“孔隙特征–损伤寿命”预测模型。

1 实验

1.1 材料

水泥(OPC)采用宁夏赛马牌 P·O 42.5R 硅酸盐水泥;高炉矿渣(GGBS)为宁夏和亿达建材公司生产,其密度为 2650 kg/m³,比表面积为 525 m²/kg;

粉煤灰(FA)为宁夏宁东产 II 级灰,3 种胶凝材料的化学成分含量见表 1。细集料采用宁夏银川西夏建材城过筛天然河沙(1.18 mm 以下);水选用银川市自来水;减水剂为聚羧酸高效减水剂,减水效率为 30%;早强剂选用天津市众联化学试剂有限公司生产纯度大于 98%的甲酸钙(C₂H₂CaO₄);高吸水树脂(SAP)为天津市华盛化学试剂有限公司生产,粒径为 30~60 目,是具有吸水–释水特性的三维网络结构聚合物,其主要成分为聚丙烯酸钠盐,吸水倍率为 150 倍。

1.2 制备

水胶质量比为 1:3,胶砂质量比为 1:1,胶凝材料为 900 g,FA:GGBS:OPC 为 1:2:7,减水剂与早强剂均为胶凝材料的 0.4%,SAP 占胶凝材料的 0.1%,内固水为 SAP 饱和吸水量的 10%。具体配合比见表 2。

表 1 化学成分表
Table 1 Chemical composition list

Material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO
OPC	64.43	21.14	5.78	3.590	2.35	1.52
GGBS	38.10	28.70	14.80	0.425	2.18	10.60
FA	14.30	47.70	24.00	4.520	1.33	2.78

w is mass fraction.

表 2 配合比
Table 2 Mix ratio

Simple	FA	GGBS	OPC	Water	Sand	Water reducing agent	Early strength agent	SAP	Internal solidification water
External curing	180	90	630	333	900	3.6	3.6	0	0
Internal curing	180	90	630	333	900	3.6	3.6	0.9	13.5

m is mass.

不同打印参数对 3DFGCM 结构密实度产生一定影响,因此通过前期实验确定最优打印参数如表 3 所示。试块制备工艺为先将粉体与早强剂进行干搅 1 min,后将水与减水剂加入湿搅 4 min 得到浆体。浇注试块(Cast)通过标准模具振捣工艺得到,3DFGCM 经过 1 d 固化后切割得到。具体过程与空间方位图如图 1 所示。

表 3 打印参数
Table 3 Printing parameters

Printing parameters	Numerical value
Horizontal printing speed/(m·min ⁻¹)	4.8
Nozzle diameter/m	0.02
Extrusion speed/(r·min ⁻¹)	3.33
Single layer printing height/m	0.01

1.3 养护方式

本工作采用 NC、SC、T₆₀、SCH 及 SAP 5 种养

护方式,每种养护方式首先放置在自然养护下固化 1 d 后,再进行后续实验。NC 组放置在常温下不作处理;SC 组在放置在标准养护箱内进行养护;T₆₀组在 60 ℃高温养护 1 d,随后放置在标准养护箱内进行养护;SCH 组将试件放置在 20 ℃的饱和 Ca(OH)₂ 水溶液中养护;SAP 组使用湿掺法加入浆体,随后放置在常温下进行养护。

1.4 方法

1.4.1 抗压强度测定方式 根据 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》与《3D 打印混凝土基本力学性能试验方法》,对试件为 40 mm×40 mm×40 mm 立方体试块进行抗压强度测试,将 3DFGCM 自然养护 1 d 后进行切割处理,在不同养护方式下养护至 28 d,将 Cast 与 3DFGCM 的 X、Y 和 Z 方向分别进行抗压强度测试。

1.4.2 各向异性系数 各向异性系数反映 3DFGCM 不同方向的抗压强度与 Cast 之间的差异,

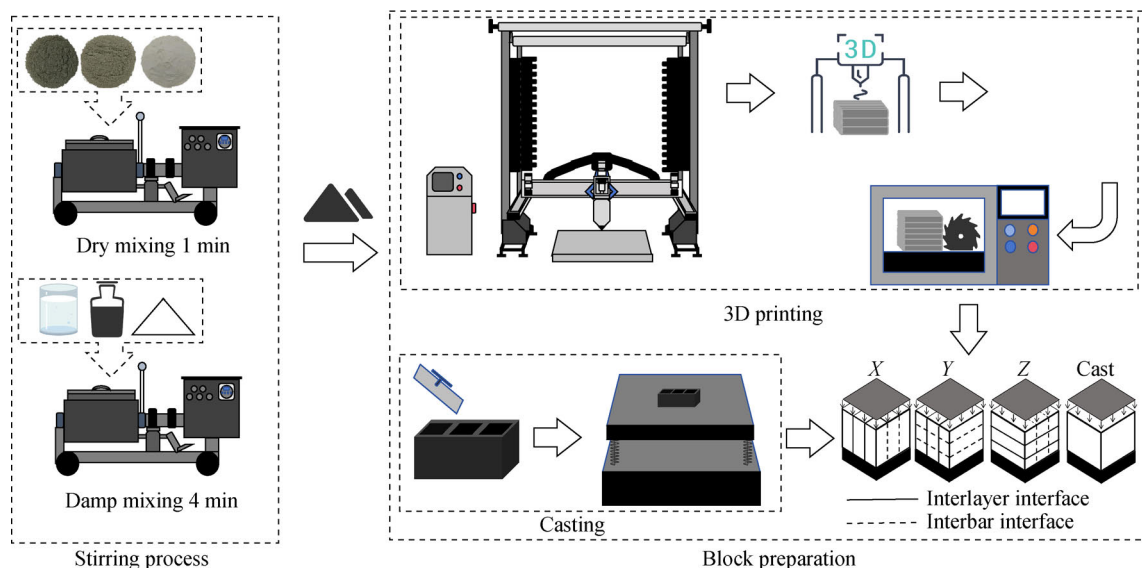


图 1 试件制备流程图

Fig. 1 Simple preparation flowchart

通过将 3DFGCM 各方向的抗压强度与浇筑试块的抗压强度进行离散化处理, 计算其均方根值, 并与浇筑试块的抗压强度进行归一化对比, 从而实现对材料力学性能各向异性的全面评价。可以对力学性能各向异性的评价更为全面, 而被广泛采用^[26-28]。具体公式见式(1)。

$$I_a = \frac{\sqrt{(f_x - f_c)^2 + (f_y - f_c)^2 + (f_z - f_c)^2}}{f_c} \quad (1)$$

式中: I_a 为各向异性系数; f_x 、 f_y 、 f_z 为打印试块 X、Y、Z 方向加载的强度, MPa; f_c 为浇筑试块的强度, MPa。

1.4.3 冻融循环试验 冻融循环试验根据 JGJ/T 70—2009 《建筑砂浆基本性能试验方法标准》进行试验。试件为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试

块, 在各自养护条件下养护 28 d 后放入水中 (15~20 °C) 浸泡 2 d, 然后将其放入冻融循环试验机中进行试验。25 次为 1 个循环对试块进行观察。仪器的冰冻温度应保持在 (-17±2) °C, 融化温度保持在 (8±2) °C。试样出现质量损失大于 5%, 相对动弹性模量损失大于 40% 时判定试块已被破坏。

1.4.4 气泡参数测定 将冻融前后试件切割制备为 100 mm×100 mm×20 mm 标准薄片试样, 对试件依次用不同目数砂纸进行逐级研磨抛光处理。经水冲洗并干燥后, 采用黑色油墨进行表面着色处理, 随后使用白色硅粉填充并用凡士林将粉体固定, 最后采用 Rapid Air 457 型气泡参数分析系统进行参数测试, 测试步骤如图 2 所示, 测定指标包括: 孔隙分布图、弦长规格及占比、空气含量和总弦长等。

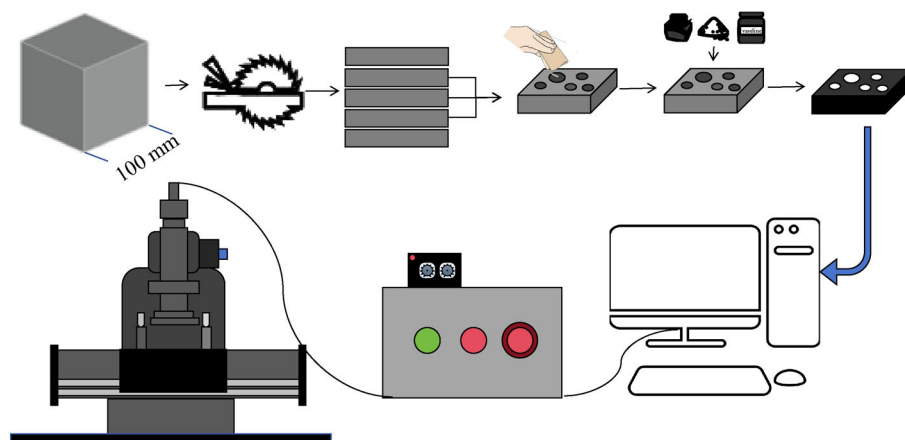


图 2 气泡参数测定流程图

Fig. 2 Bubble parameters measurement flowchart

2 结果与讨论

2.1 力学各向异性分析

2.1.1 抗压强度 图 3 揭示了在不同养护制度下 28 d 抗压强度的变化规律, 由图 3 可见, 试块表现出 $\text{Cast} > X > Z > Y$ 的趋势, 这一现象主要与打印工艺和材料特性有关。首先, Cast 通过振捣能有效排出气泡, 水化产物分布均匀, 形成连续致密的基体; X 方向与打印路径方向一致, 砂浆在沉积过程中受到挤压力作用, 内部颗粒排列更为紧密, 层间结合力较强, 因此抗压强度最高。 Z 方向垂直于打印层, 其强度主要取决于层间结合力, 但由于打印过程中层与层之间的界面可能存在微小缺陷或未完全融合, 导致强度略低于 X 方向。而 Y 方向的强度最低, 可能是由于该方向与打印路径垂直, 砂浆在沉积过程中受到的挤压力较弱, 且该方向更容易在打印过程中产生的孔隙、裂纹等缺陷, 导致其力学性能显著下降^[29–30]。

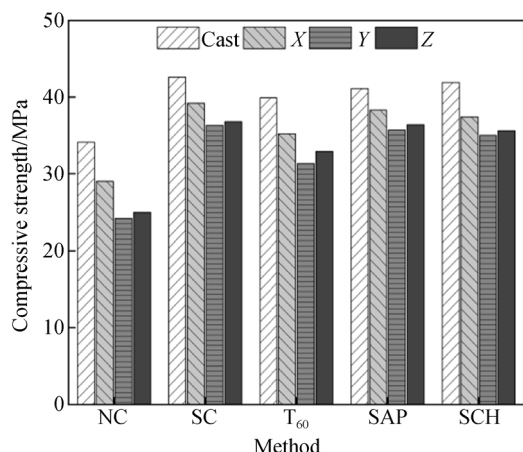


图 3 28 d 抗压强度

Fig. 3 Compressive strength at 28 d

并且不同养护方式对 3DFGCM 抗压强度影响显著, SC 因环境湿度充足促进胶凝相充分水化, 形成均匀基体与致密界面过渡区, 其 X 、 Y 、 Z 方向抗压强度分别为 39.2、36.3、36.8 MPa; 而 SAP 通过水分缓释机制抑制层间冷缝, 优化孔隙分布, Y 方向抗压强度相较 Cast 损失 13.1%; NC 因环境湿度波动引发干燥收缩及孔隙粗化, Y 方向抗压强度为 24.2 MPa。另外, 浇注块抗压强度 $\text{SCH} > \text{SAP}$ 而 3DFGCM 却呈现 $\text{SAP} > \text{SCH}$, 这是因为 3DFGCM 夹层区域易形成离子扩散的通道, 整体强度有所下降, 并且由于接触比表面积增大, 导致 28 d 时 SCH 组长时间浸泡出现浸出效应^[31], 从而对于 3DFGCM 抗压

强度起到一定的负面影响, 但 SAP 通过优化新拌浆体流变特性、缓释水分维持界面湿度以及抑制层间收缩, 一定程度弥补施工工艺导致的界面的缺陷^[32]。

2.1.2 各向异性系数分析 为表征不同养护方式下砂浆在 28 d 抗压强度的各向异性系数, 根据式(1)计算各向异性系数, 如图 4 所示, 各向异性系数随养护方式呈现差异 ($\text{NC} > \text{T}_{60} > \text{SCH} > \text{SC} > \text{SAP}$), 这与水分-水化-缺陷的作用密切相关。其中 SC 与 SAP 通过维持浆体湿度环境, 促进 C-S-H 凝胶连续生成, 降低孔隙连通性并增强层间黏结强度, 从而抑制各向异性。NC 组因温度波动与湿度波动引发自干燥收缩与孔隙粗化, 加剧 Y 轴方向应变局部化。

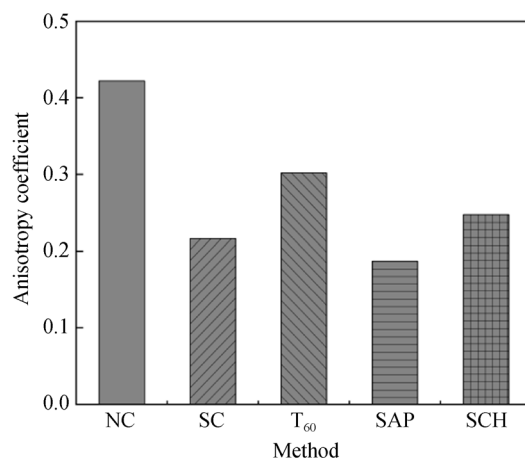


图 4 不同养护方式下各向异性系数

Fig. 4 Anisotropy coefficient under different curing methods

2.2 冻融循环下 3D 打印砂浆劣化性能

2.2.1 冻融损伤阶段性演化特征 图 5 为冻融循环作用下 NC 组试件砂浆试块的破坏对比情况, NC 组试件因缺乏抗冻改性措施, 其损伤特征可清晰表征多尺度耦合劣化机制。通过比较 Cast-NC(图 5a~图 5c)与 3D-NC(图 5d~图 5f)在冻融循环作用下的宏观形貌演化可知, 初始状态下, 2 组试件表面均呈现致密光滑形貌, 未见明显缺陷(图 5a 和图 5d)。经 50 次冻融循环后, 微裂纹在界面过渡区(ITZ)及孔隙集中区发展, 其中 3DFGCM 因层间弱结合界面与定向孔隙的协同效应的影响, 试块表面发生轻微剥落(图 5b 和图 5e)。至 150 次循环时, 材料进入加速损伤阶段, Cast 表面呈现网状裂纹与局部片状剥落(图 5c), 而 3DFGCM 则因层间水分迁移通道贯通, 出现显著的分层剥离现象与边缘片状剥落(图 5f)。这一形貌演化过程验证了多因素耦合作用, 首先, 试件孔隙内冰晶膨胀与水分吸收在层间空腔尖端产生应力集中; 其次, 孔隙区域水化产物断裂与微裂纹网络贯通形成逾渗路径。

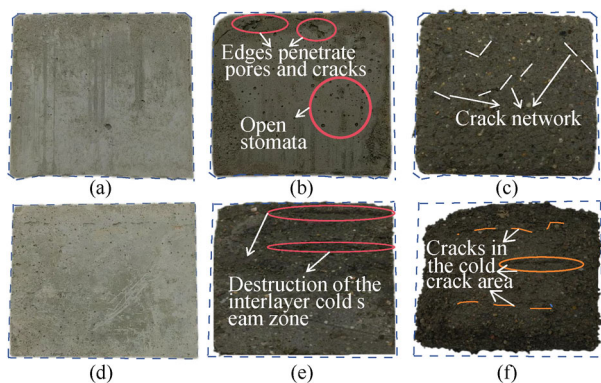


图 5 冻融循环下 NC 组的损伤表面

Fig. 5 Damage surface of NC group under freeze-thaw cycles

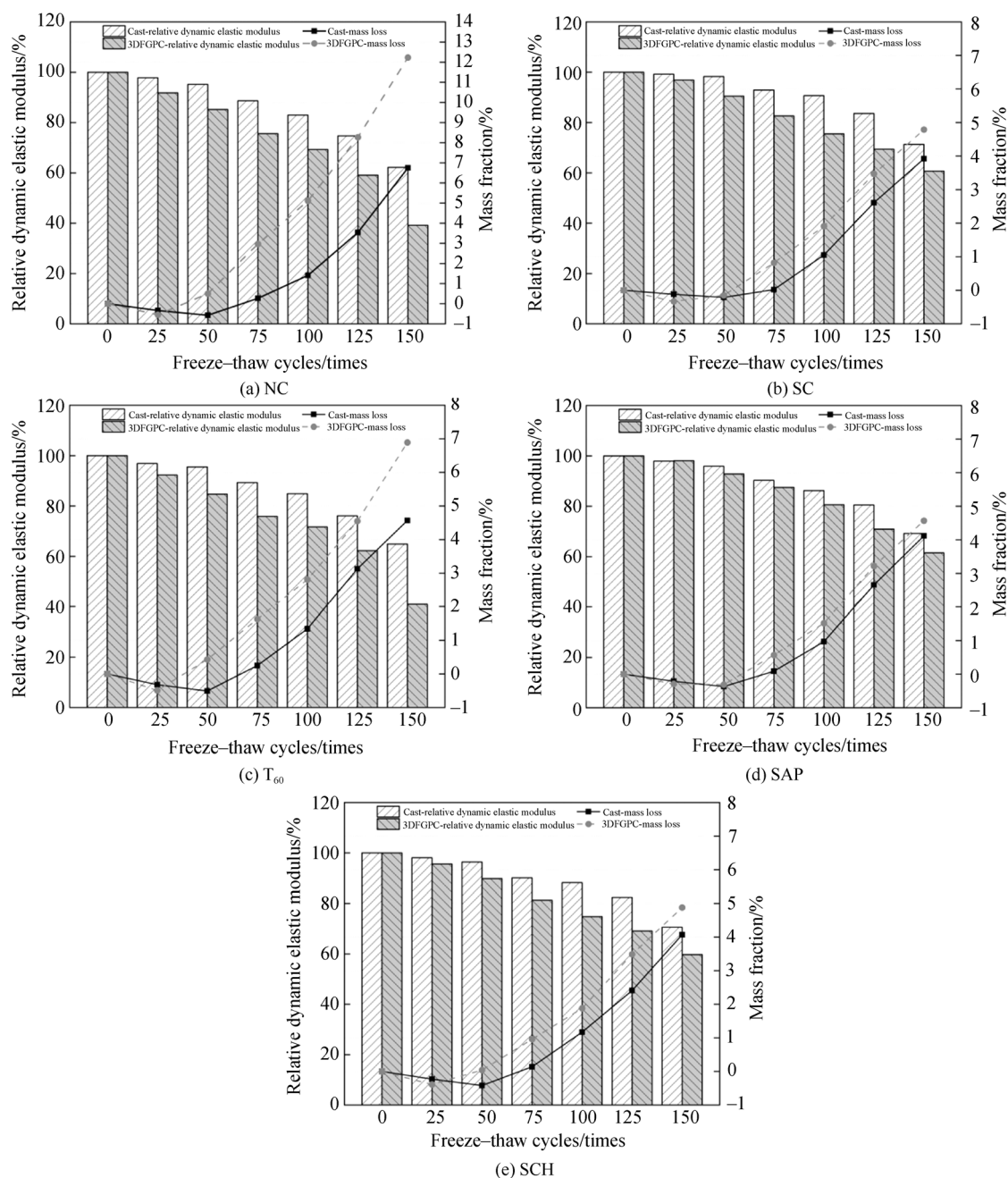


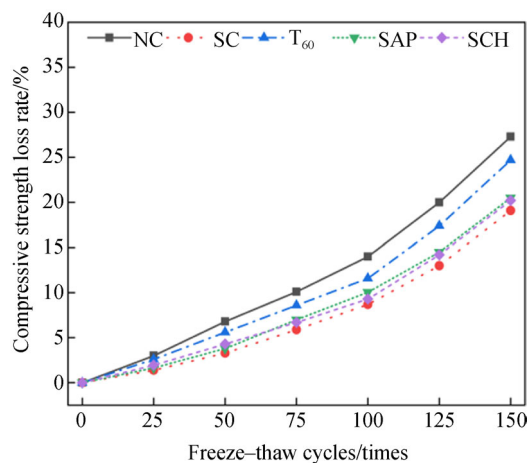
图 6 相对动弹性模量和质量损失率

Fig. 6 Relative dynamic elastic modulus and mass loss rate

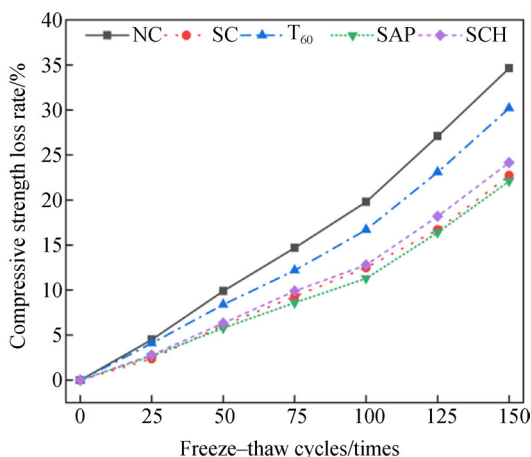
2.2.2 相对动弹性模量与质量损失 图 6 为不同养护方式下试块冻融循环后平均动弹性模量保留率与平均质量损失率的变化情况。如图 6 所示, 3DFGCM 的动弹性模量保留率下降幅度更大, 150 次冻融循环后, 3D-NC 组比 Cast-NC 组的动弹性模量保留率降低了 23.5%, 质量损失率增加了 81.2%。随着冻融循环次数的增加, 各组试件的动弹性模量保留率呈现加速下降的趋势, 而质量损失率则表现出先降低后升高的变化规律。此外, 养护制度对 3DFGCM 的抗冻融能力具有显著影响。3D-SAP 内养护通过水平平衡改善层间黏结, 同时形成致密结构并在水分释

放后产生微孔以减缓冻胀应力,使得 150 次循环后动弹性模量保留率较 3D-NC 组提升了 29.6%,质量损失降低了 167.6%。相比之下,3D-NC 与 3D-T₆₀ 组因温湿度变化导致结构稳定性下降,抗冻融能力显著低于其他 3 组,在 $N=125$ 时已发生破坏。

2.2.3 强度损失率 图 7 展示了在不同养护条件下,经过冻融循环处理的砂浆试块强度损失率的变化趋势。如图 7 所示,冻融循环作用下 3DFGCM 强度损失显著高于 Cast,150 次循环后 NC 组 3DFGCM 强度损失率达 34.6%,而 SAP 内养护组凭借水分缓释抑制层间冷缝、湿度梯度调控 C-S-H 凝胶生成及微孔缓冲冻胀应力的协同作用,强度损失率最低为 22.5%。标准养护虽优化水化均质性,但对 3D 打印层间缺陷修复效果低于 SAP,强度损失率为 22.7%。强度损失呈 2 阶段演化: $N<100$ 次时渐进增长, $N\geq 100$ 次后微裂纹网络贯通触发劣化加速。该拐点现象与疲劳损伤累积到临界值、内部微裂纹网络贯通触发所致。



(a) Cast



(b) 3D

图 7 抗压强度损失率

Fig. 7 Compressive strength loss rate

2.3 冻融前后孔隙结构分析

2.3.1 孔隙形貌分析 图 8 展示了经历 150 次冻融循环前后,NC 组 Cast 与 3DFGCM 的典型孔隙形貌扫描照片。由图 8 可见,冻融循环后,2 类试件的孔隙结构均发生劣化,表现为孔隙粗化(即孔径增大、有害孔比例上升)。尤为显著的是,3DFGCM 因其固有的层间孔隙,在界面区域产生薄弱结合面。冻融循环诱导的损伤在层间孔隙边缘区域萌生并扩展,导致明显的层间破坏现象。现有研究证实^[33–34],冻融过程中孔隙水结冰产生体积膨胀,对孔壁施加显著的膨胀应力,尤其在孔隙尖端区域形成应力集中。该应力超过材料强度极限时引发微裂纹,且新形成的微裂纹极易与邻近孔隙连通。孔隙水在冻结膨胀过程中被迫迁移,由此产生的静水压力进一步加剧了孔隙结构的破坏。

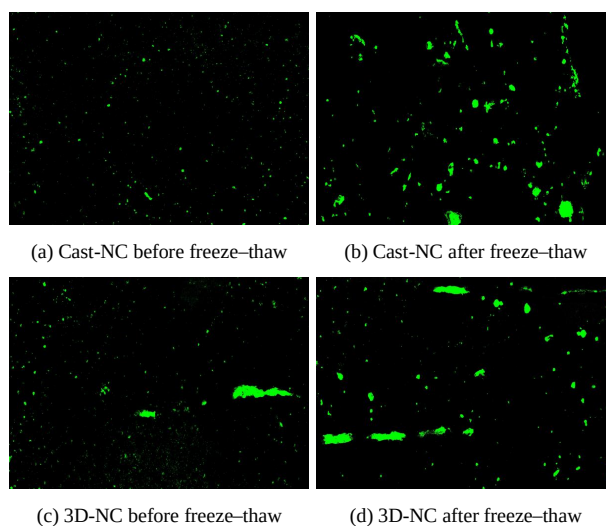


图 8 冻融循环前后 NC 组孔隙形态的扫描电子显微镜照片
Fig. 8 Scanning electron micrographs of pore morphology in the NC group before and after freeze-thaw cycles

2.3.2 孔隙分级占比分析 基于孔隙分级理论^[35–36],图 9 系统分析了冻融循环对不同养护制度下 3D 打印砂浆孔隙尺寸分布的影响。研究表明 3DFGCM 由于层间空腔与冷缝的存在,其大孔(>100 nm)占比显著高于 Cast,这导致 3DFGCM 的抗冻融性能显著降低。冻融循环后,3DFGCM 的孔隙粗化比例显著增加,其中 3D-NC 组粗化比例最高,达到 45%;3D-SC 组与 3D-SAP 组相对稳定,分别占比 31%与 30%。这一现象揭示了以下机理:1) 3D 打印砂浆的定向孔隙结构及其各向异性特征加剧了冻胀应力的集中效应,导致大孔比例显著增加;2) 根据 Powers^[37]提出的静水压理论,孔隙细化可以有效调整间距系数,从而延缓冻融损伤,这一机制

在 3D-SC 组与 3D-SAP 组中得到了充分体现; 3) SCH 组在短期内通过调控氢氧化钙结晶, 降低了孔隙劣化程度, 提升了抗冻性能, 但长期养护过程中长时间浸泡出现浸出效应, 反而导致大孔占比增加至 43%; 4) T_{60} 组由于高温加速了水化, 短期内孔隙细化效果显著, 但在冻融循环中, 其内部微裂纹扩展更为明显, 导致孔隙粗化比例较高。综上所述, 不同养护制度对 3D 打印砂浆的孔隙结构演化及抗冻性能具有显著影响, 其中标准养护与 SAP 内养护在优化孔隙结构、提升抗冻性能方面表现更为优异。

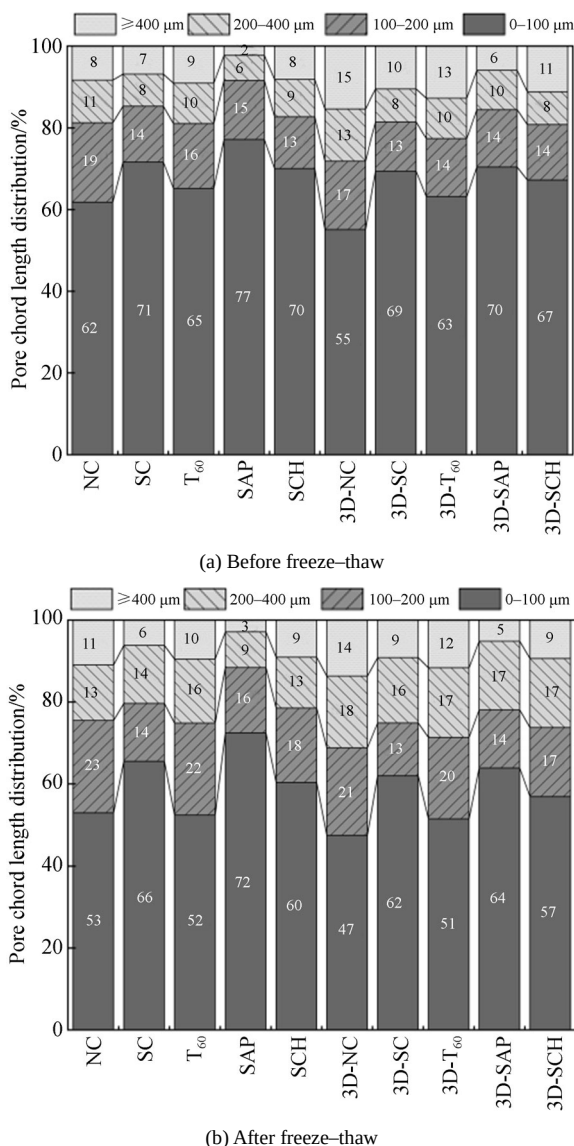


图 9 冻融前后孔隙分级占比

Fig. 9 Porosity classification ratio before and after freeze-thaw

2.3.3 空气含量和总弦长 图 10 为冻融前后 Cast 与 3DFGCM 的含气量与总弦长变化规律, 结

合图 7 量化分析, 3DFGCM 含气量与总弦长增幅均显著高于 Cast。冻融前, 3D-NC 含气量(1.15%)与总弦长(29 390 μm)分别为 Cast 的 1.5 倍, 归因于层间弱界面影响。冻融后, 3D-NC 组含气量与总弦长增幅(均达 65.3%)最大, 3D- T_{60} 组次之, 而 3D-SAP 组表现最优孔隙稳定性。这是因为 NC 组高孔隙连通性与 T_{60} 组热历史诱导初始孔隙较大, 二者加速冻胀压力集中效应导致冻融过程中水分渗透通量与冻胀应力协同导致孔隙粗化; 此外, SAP 组通过孔隙调控与打印过程水分调节机制, 降低初始含气量同时提高抗冻性。

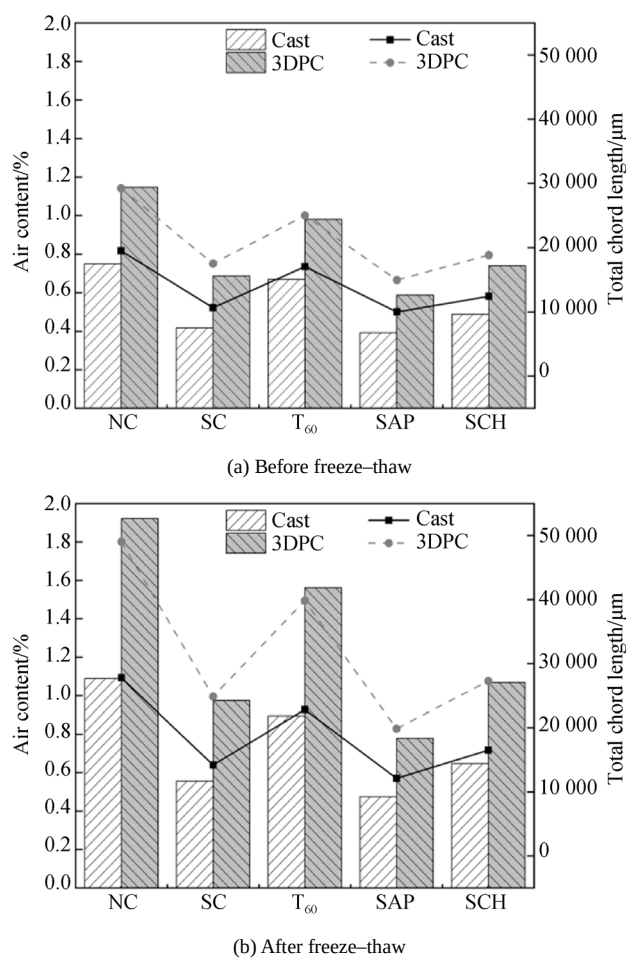


图 10 冻融前后空气含量和总弦长

Fig. 10 Air content and total chord length before and after freeze-thaw

2.3.4 相关性分析 图 11 为冻融前后 3DFGCM 含气量与抗压强度的相关性。由图 11 可见, 3DFGCM 含气量与抗压强度在冻融循环前后均呈现显著负相关性。冻融前, 抗压强度随含气量增加呈线性递减, 其斜率绝对值较大(19.21 MPa/%), 表明初始孔隙结构对抗压强度的敏感性较高; 冻融后线性关系仍成立

但斜率绝对值降低至 10.74 MPa/%, 这一变化可归因于: 冻融循环引发微裂纹网络贯通, 使孔隙连通性成为主导劣化因素, 含气量的独立影响权重相对降低; 并且截距由 49.85 MPa 降至 38.43 MPa, 反映冻融循环导致水泥基体产生破坏, 材料的强度显著衰减。进一步表明, 3DFGCM 因各向异性与层间弱结合界面,

导致抵抗冻融的能力下降。

2.3.5 冻融循环下孔隙结构演化机制 图 12 为随着冻融循环次数增加 3DFGCM 孔隙结构演化机制示意图。在水分侵入阶段(图 12a), 水分持续进入孔隙内部, 在冻胀阶段(图 12b), 孔隙水结冰体积膨胀, 对孔壁产生膨胀应力。同时, 结冰膨胀迫使未

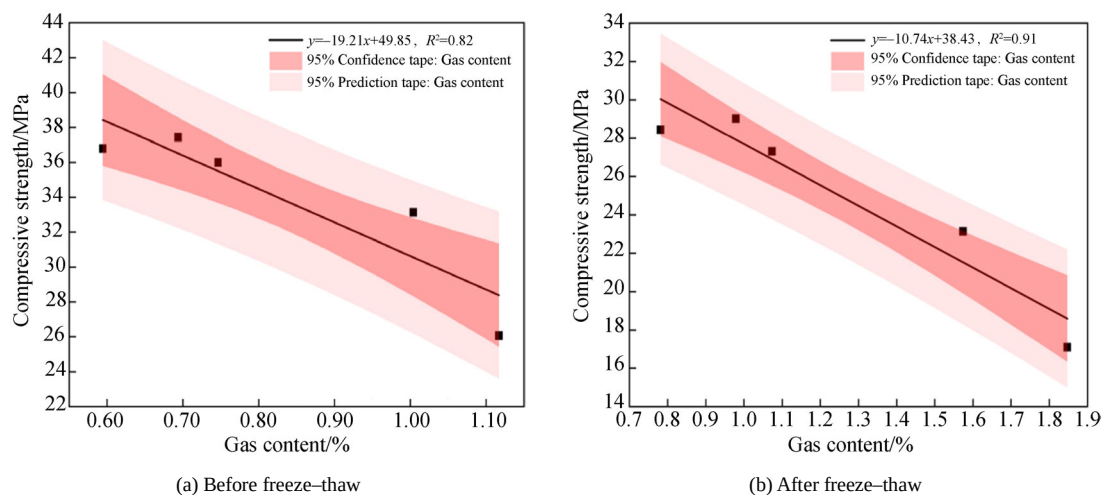


图 11 冻融前后 3DFGCM 含气量与抗压强度的相关性

Fig. 11 Correlation between air content and compressive strength of 3DFGCM before and after freeze-thaw

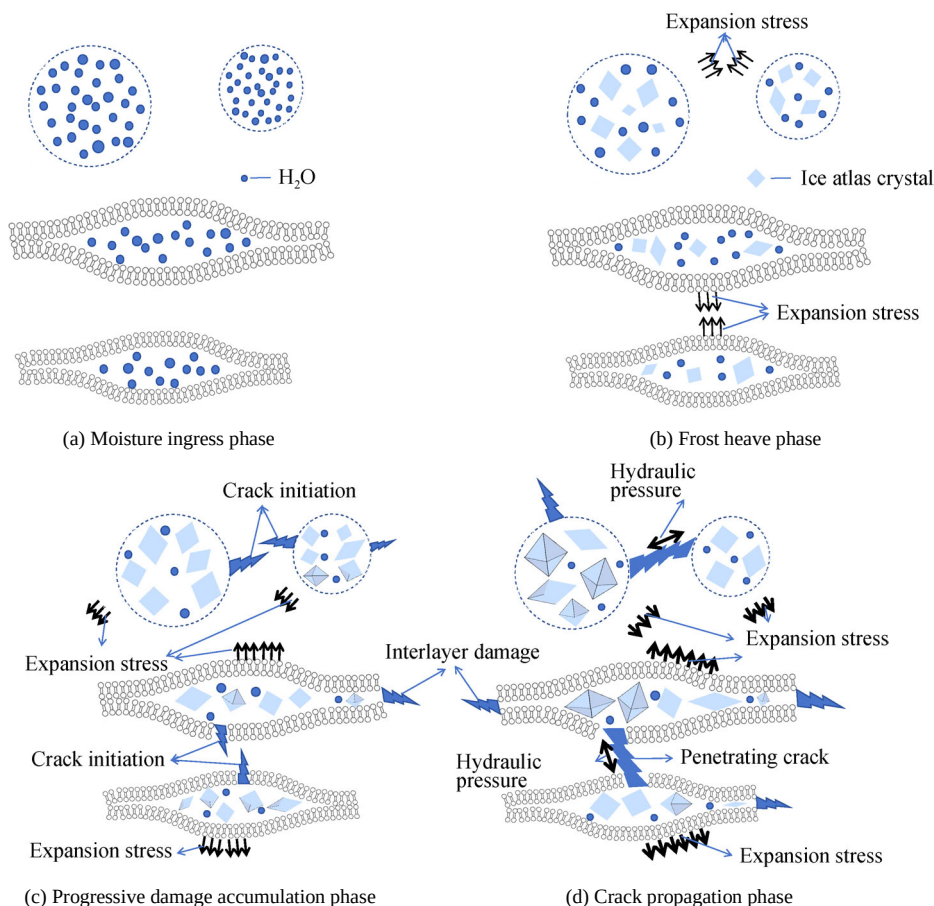


图 12 孔隙和层间冻胀破坏示意图

Fig. 12 Schematic diagram of pore and interlayer frost heave damage

冻结的孔隙水向周围迁移,在此过程中形成静水压力。膨胀应力和静水压力共同持续作用于砂浆基体(图 12c),导致微裂纹萌生与扩展以及孔隙劣化加剧。在反复冻融作用下(图 12d),微裂纹网络不断延伸贯通,形成逾渗路径,最终致使表面砂浆剥落,质量损失率持续上升。值得注意的是,3DFGCM 的层间界面区域是冻融损伤的敏感区,该处的微裂纹更易萌生、扩展,甚至可能演化为宏观的分层裂缝,进一步加速材料的整体劣化。

2.4 冻融损伤模型与寿命预测模型

基于连续介质损伤力学理论框架,构建冻融循环作用下 3DFGCM 与 Cast 的损伤演化模型。基于相对动弹性模量,定义冻融损伤度 D_n 来表征砂浆的损伤程度。具体表达式如式(2)所示:

$$D_n = 1 - \frac{E_n}{E_0} \quad (2)$$

式中: D_n 为冻融损伤度; E_0 为初始动弹性模量; E_n 为第 n 次冻融循环后的动弹性模量。

利用 Weibull 双参数损伤模型对 3DFGCM 进行损伤预测。定义 f_n 为基于冻融循环下的概率密度函数,具体表达式如式(3)所示:

$$f_n = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{n}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{n}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (3)$$

式中: n 为循环次数,次; α 和 β 分别定义为特征寿命参数和 Weibull 形状参数, $\alpha > 0$, $\beta > 0$ 。

疲劳破坏服从 Weibull 双参数损伤模型,冻融损伤方程等价于式(3),对式(3)进行积分,表达式如式(4)所示:

$$D_n = f_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (4)$$

对式(4)两边进行取对数:

$$\ln \left(\ln \frac{1}{1 - D_n} \right) = \beta \ln n - \beta \ln \alpha \quad (5)$$

令式中 $Y = \ln \left(\ln \frac{1}{1 - D_n} \right)$, $X = \ln n$, $A = \beta$, $B = \beta \ln \alpha$

得式(6):

$$Y = AX + B \quad (6)$$

基于上述公式进行相对动弹性模量与循环次数拟合,可以得出冻融循环下 5 种养护方式 Cast 与 3DFGCM 的损伤演化方程的各个参数,如表 4 所示。

根据表结果,得到各组在冻融循环作用下基于 Weibull 分布的损伤拟合方程,见表 5。

表 4 Weibull 双参数冻融损伤模型参数

Table 4 Weibull two-parameter damage model distribution regression parameters

Number	A	B	α	R^2
Cast-NC	1.216 26	-6.863 09	280.415 37	0.998 93
Cast-SC	1.965 32	-10.806 67	247.854 84	0.981 45
Cast-T ₆₀	1.301 87	-7.354 42	283.114 52	0.999 52
Cast-SAP	1.833 71	-10.085 77	246.537 02	0.984 46
Cast-SCH	1.856 34	-10.265 46	253.343 27	0.986 06
3D-NC	1.183 06	-6.259 54	197.305 87	0.996 56
3D-SC	1.150 87	-6.492 11	280.695 05	0.998 64
3D-T ₆₀	1.243 40	-6.571 42	198.117 57	0.998 85
3D-SAP	1.217 07	-6.840 50	275.423 24	0.999 72
3D-SCH	1.093 55	-6.177 29	281.945 12	0.997 07

$A=\beta$, $B=\beta \ln \alpha$. α is characteristic lifetime parameter. β is Weibull shape parameter. R^2 is determination coefficient.

表 5 冻融损伤的拟合方程

Table 5 Fitting equations for freeze-thaw damage

Number	Freezing-thaw damage fitting equation	Number	Freezing-thaw damage fitting equation
Cast-NC	$D_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{280.42} \right)^{1.22} \right]$	3D-NC	$D_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{197.31} \right)^{1.18} \right]$
Cast-SC	$D_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{247.85} \right)^{1.97} \right]$	3D-SC	$D_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{280.7} \right)^{1.15} \right]$
Cast-T ₆₀	$D_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{283.11} \right)^{1.3} \right]$	3D-T ₆₀	$D_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{198.12} \right)^{1.24} \right]$
Cast-SAP	$D_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{246.54} \right)^{1.83} \right]$	3D-SAP	$D_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{275.42} \right)^{1.22} \right]$
Cast-SCH	$D_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{253.34} \right)^{1.86} \right]$	3D-SCH	$D_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{281.95} \right)^{1.09} \right]$

研究表明^[37]当 D_n 为 0.4 时试块发生破坏, 且中国东北、华北、西北地区每年分别有 120、84、118 次冻融循环(FTC)。冻融循环次数在实验室模拟环境与自然环境中的等效比例为 1 : 12。3DPCMC 实际使用寿命的表达式为式(7)。

$$T = \frac{kN}{M} \quad (7)$$

式中: T 为使用寿命, 年; k 为室内冻融循环 1 次等同自然冻融循环次数的系数; N 为预测模型下最大冻融循环次数, 次; M 为自然环境中一年经历冻融循环次数, 次。

通过式(7)计算, 得出不同地区不同养护方式下试块使用寿命, 如表 6 所示。

表 6 不同地区基于 Weibull 冻融损伤模型的预测寿命
Table 6 Predicted life based on Weibull freeze-thaw damage model in different regions

Number	Predicted life in different regions/a		
	Northeastern China	North China	Northwestern China
Cast-NC	16.2	23.1	16.5
Cast-SC	17.6	25.1	17.9
Cast-T ₆₀	16.9	24.1	17.2
Cast-SAP	17.1	24.4	17.4
Cast-SCH	17.6	25.1	17.9
3D-NC	11.2	16.0	11.4
3D-SC	15.6	22.3	15.9
3D-T ₆₀	11.5	16.4	11.7
3D-SAP	15.9	22.7	16.2
3D-SCH	15.2	21.7	15.5

通过 Weibull 预测寿命模型进行对比分析表明 3DFGCM 相较于 Cast 寿命显著降低。养护方式对抗冻融性能的影响呈显著差异: 对于 Cast, SCH 与 SC 可有效提升寿命(在中国华北、西北和东北寿命预测分别为 25.1、17.9、17.6 年); 而对于 3DFGCM, 3D-SAP 具有抗冻融性能优势, 其寿命预测值(在中国华北、西北和东北寿命预测分别为 22.7、16.2、15.9 年)较 3D-NC 养护组提升均达 42%。

2.5 基于反向传播(BP)神经网络冻融性能预测模型

对比既有研究^[38–39], 传统冻融评价方法受限于单一宏观参数与破坏性实验, 而通过上述实验发现孔隙结构参数与冻融损伤之间有强相关性。因此, 本工作创新性地提出使用神经网络构建孔隙结构与冻融性能之间关系模型。BP 神经网络作为一种多层前馈非线性映射模型, 通过梯度下降法来最小化输出误差, 其具有强大的非线性映射能力和灵活的网

络结构, 可以有效克服了传统 Weibull 模型依赖破坏性试验的局限, 实现基于初始孔隙参数的冻融寿命与损伤预测。

模型输入层包含 28 d 3D 打印试块的含气量、平均弦长、比表面积及气泡间距系数 4 个孔隙特征参数, 输出层对应 Weibull 模型输出的极限冻融次数与中国西北寒区服役寿命双指标。数据集共 108 组样本, 按 7 : 3 比例划分为 75 组训练集与 33 组测试集。依据经验公式(8)优化隐含层神经元数为 4, 保证模型泛化能力的同时避免过拟合风险, 并将决定系数(R^2)、平均绝对误差(MAE)与均方根误差(RMSE)作为评价指标, 系统评估模型的预测性能。

$$N_2 = \frac{N_s}{[a(N_1 + N_3)]} \quad (8)$$

式中: N_2 为隐藏层神经元数, 个; N_s 为训练集样本数, 个; a 为常数; N_1 为输入层神经元数, 个; N_3 为输出层神经元数, 个。

根据上述模型, 图 13 和图 14 分别为孔隙结构参数构建对抗冻融性能预测情况与预测误差图。在极限冻融次数预测中, 训练集与测试集的 R^2 分别为 0.987 和 0.991, 服役寿命预测的 R^2 分别为 0.972 与 0.991, 表明该模型可解释训练数据 98.7%和 97.2%的变异性, 且测试集预测精度达 99.1%, 验证其优异的泛化能力。误差分析显示: 极限冻融次数预测的训练集 MAE 与 RMSE 分别为 1.964 和 2.420, 测试集分别为 1.494 和 2.091; 服役寿命预测的训练集 MAE 与 RMSE 为 0.192 和 0.368, 测试集分别为 0.211 和 1.434。所有误差值均低于允许阈值, 且测试集误差均小于训练集, 印证模型可靠性并验证孔隙特征对冻融损伤与寿命的影响作用显著。

2.6 XRD 微观分析

图 15 为不同养护制度下 3D 打印砂浆 28 d 龄期的 XRD 谱, 从整体上观察各组的衍射谱可见, 各组样品衍射样图形态基本类似, 均含有二氧化硅(SiO_2)、氢氧化钙 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ 、钙矾石(Aft)、碳酸钙(CaCO_3)以及未水化水泥熟料 C_3S (C_3S 和 C_2S)。其中 SC 组水化硅酸钙(C-S-H)凝胶峰强基准值最高, 而 SAP 组因水分缓释促进 C-S-H 凝胶材料产生, 峰强度相较 NC 组提升 26.9%, 结合强度考虑, 凝胶材料显著影响强度发展; SCH 组碱性环境使得钙矾石峰显著高于其他 4 组并且促进与粉煤灰与矿粉内活性材料反应, 钙矾石可以提高早期强度, 但过量

会引发膨胀裂纹; T_{60} 组高温与 NC 组水分不足均致 C_nS 未水化相残留, 且 C-S-H 聚合度下降, 导致后

期强度衰减, 此结果从物相层面解析了力学与耐久性差异的微观成因。

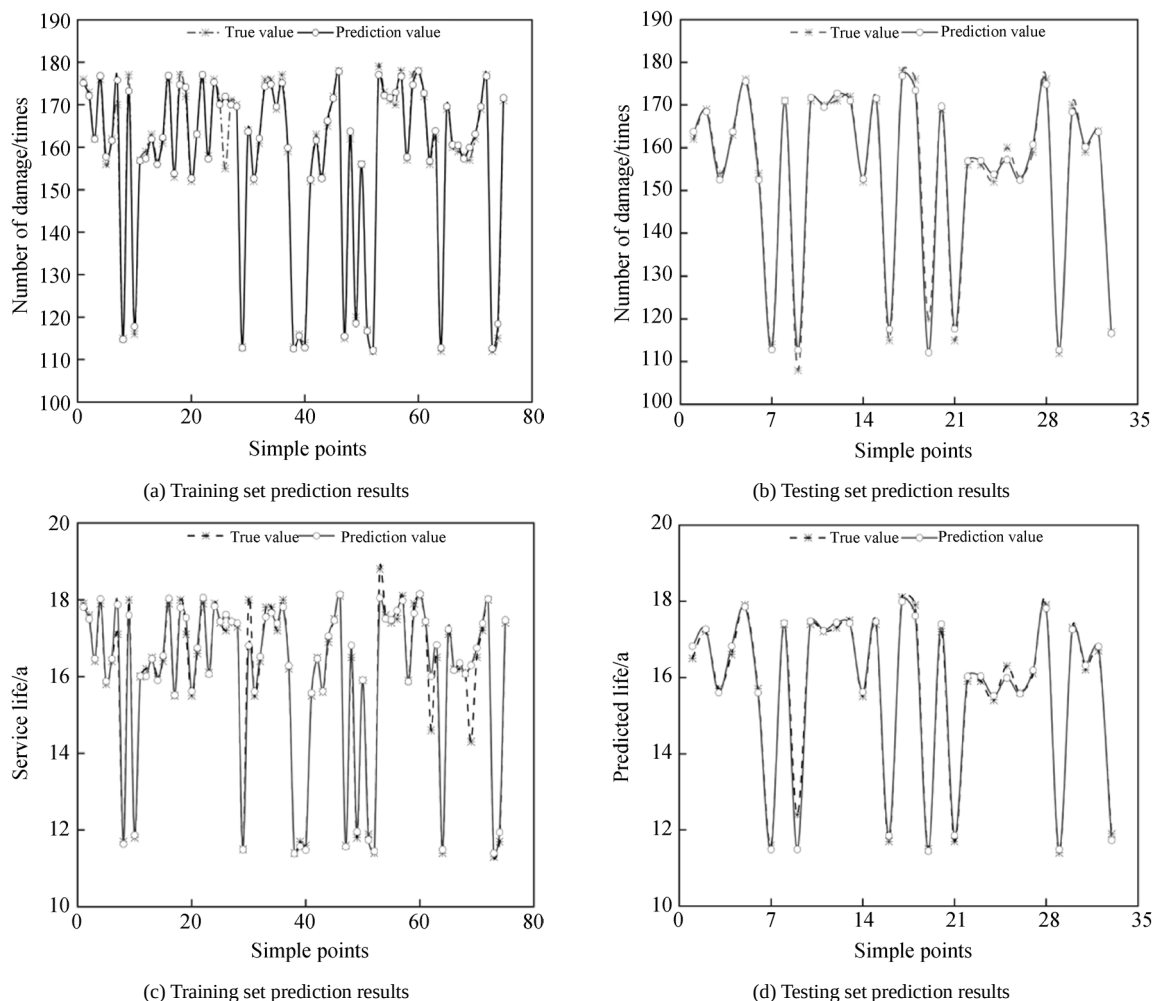


图 13 极限冻融次数与中国西北寒区服役寿命预测结果

Fig. 13 Prediction of maximum freeze-thaw times and service life in cold Northwest China

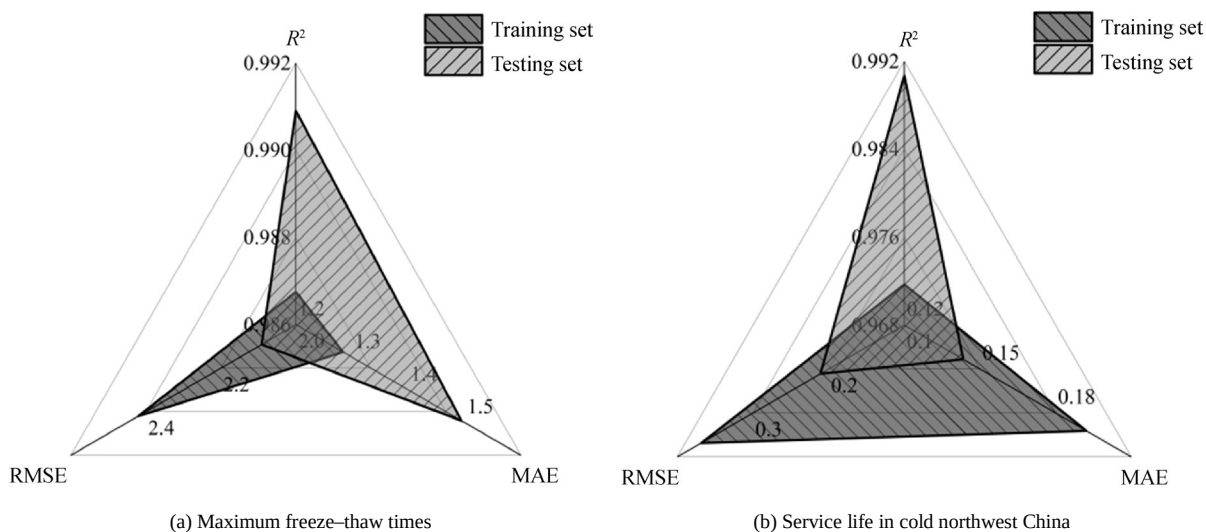


图 14 极限冻融次数与中国西北寒区服役寿命预测的评价指标

Fig. 14 Evaluation index of maximum freeze-thaw times and service life prediction in cold Northwest China

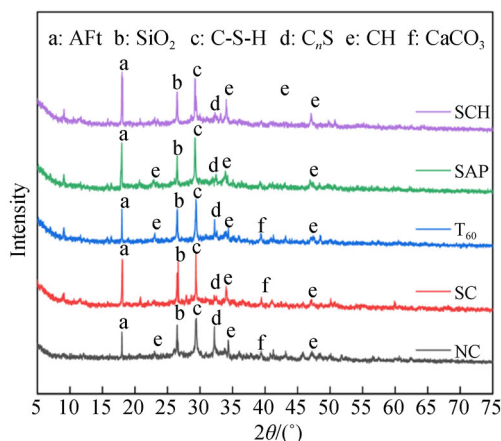


图 15 不同养护制度下 3D 打印砂浆 28 d 龄期的 XRD 谱
Fig. 15 XRD patterns of 3D printed mortar under different curing regimes at 28 d

3 结论

本工作系统研究了不同养护方式对 3D 打印砂浆性能的影响。通过分析力学各向异性, 耐久性与冻融前后孔隙结构变化规律, 构建了 BP 神经网络实现 28 d 试块孔隙结构参数对极限冻融次数与中国西北寒区服役寿命的预测, 并得出以下结论:

1) 3DFGCM 28 d 抗压强度与各向同性系数低于 Cast. 3D-SC 对 28 d 抗压强度呈现最优增强效果; SAP 提高 28 d 抗压强度至 36.8 MPa, 较 NC 组增幅为 41.17%, 各向异性系数最低(0.187)。

2) 不同养护制度下 3DFGCM 的抗冻性差异显著: 自然养护与高温养护试件均在 125 次冻融循环时破坏, 而 SAP 养护试件抗冻性最优, 150 次循环后动弹性模量保留率达 61.5%, 质量损失仅为 4.57%, 掺入 SAP 能改善工艺缺陷并显著抑制孔隙粗化, 有效抑制 3DFGCM 形成椭圆形孔隙。

3) 以相对动弹性模量为评价指标, 使用 Weibull 损伤与寿命预测模型预测 3DFGCM 的冻融损伤与服役寿命, R^2 在 0.98 以上, 3D-SAP 表现最优为 15.9 年。并基于 BP 神经网络实现孔隙结构参数与 Weibull 预测下损伤与寿命的有效关联, R^2 在 0.97 以上。为 3D 打印建材的养护方式优化提供参考。

4) 微观结构方面, XRD 谱显示, SC 与 SAP 组因水分缓释显著促进 C-S-H 凝胶生成, 有效改善了水泥基材料的微观结构, 但 NC 与 T60 组引发 C_nS 未水化相残留。

本工作所构建的 BP 神经网络模型实现了基于孔隙参数的冻融寿命预测, 但仍存在一定局限性: 模型输入参数仅涵盖 4 项孔隙特征, 未考虑环境温度与微观结构演变等其他潜在因素的影响; 训练数

据源于特定材料与区域, 普适性有待进一步验证; 且黑箱模型缺乏物理解释性, 制约了其在工程中的透明应用。后续研究将引入多环境参数、扩展数据集规模, 并融合机理模型以增强预测鲁棒性与可解释性。

参考文献:

- [1] NGO T D, KASHANI A, IMBALZANO G, et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges[J]. *Compos Part B Eng*, 2018, 143: 172–196.
- [2] HAJARE D M, GAJBHIYE T S. Additive manufacturing (3D printing): Recent progress on advancement of materials and challenges[J]. *Mater Today Proc*, 2022, 58: 736–743.
- [3] 史建新, 孙星海, 周林邦, 等. 赤泥基固废矿井充填材料的制备与性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2024, 27(10): 946–954.
SHI Jianxin, SUN Xinghai, ZHOU Linbang, et al. *J Build Mater*, 2024, 27(10): 946–954.
- [4] 高英力, 祝张煌, 孟浩, 等. 电石渣-脱硫石膏-钢渣改性粉煤灰地聚物协同增强机理[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(8): 870–878.
GAO Yingli, ZHU Zhanghuang, MENG Hao, et al. *J Build Mater*, 2023, 26(8): 870–878.
- [5] YAN R Z, MENG F Q, KE G J, et al. Comparative evaluation of the applicability of 3D printing mortar with different waste powders[J]. *Constr Build Mater*, 2024, 443: 137825.
- [6] WANG X Y, ZHOU M, BAI J T, et al. Research on the rheological properties and diffusion law of coal-based solid waste geopolymer grouting material[J]. *Materials*, 2024, 17(22): 5433.
- [7] ZHANG J J, JIN C Z, WANG B Q, et al. Study on the micro-rheological properties of fly ash-based cement mortar[J]. *Constr Build Mater*, 2024, 442: 137664.
- [8] DE LA FLOR JUNCAL L, LOPORCARO G, SCOTT A, et al. Influence of printing parameters on the durability of 3D-printed limestone calcined clay cement mortar: Overlap between filaments and nozzle offset[J]. *Mater Struct*, 2024, 57(8): 191.
- [9] NODEHI M, AGUAYO F, NODEHI S E, et al. Durability properties of 3D printed concrete (3DPC)[J]. *Autom Constr*, 2022, 142: 104479.
- [10] 朱伶俐, 杨章, 赵宇, 等. 钢渣-矿渣复合水泥基材料 3D 打印性能[J]. *材料导报*, 2023, 37(12): 111–116.
ZHU Lingli, YANG Zhang, ZHAO Yu, et al. *Mater Rep*, 2023, 37(12): 111–116.
- [11] LI Y F, CHEN S S, YANG L H, et al. Investigation of the impact of material rheology on the interlayer bonding performance of solid waste 3D-printed components[J]. *Buildings*, 2025, 15(5): 780.
- [12] WEI Y J, LI L, LI Z J, et al. Preparation of vegetative concrete with recycled aggregate: Mix proportion orthogonal test, curing methods, and microstructure[J]. *Constr Build Mater*, 2025, 460: 139892.
- [13] SU Y, QIAN Y L, SUN M, et al. The effects of curing conditions on the performance and carbon dioxide emissions of fly ash-magnesium phosphate cement repair materials for pavement maintenance[J]. *J CO2 Util*, 2024, 90: 102998.
- [14] 蒋睿. 早期养护方式对超高性能混凝土性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(10): 1659–1668.
JIANG Rui. *J Chin Ceram Soc*, 2020, 48(10): 1659–1668.
- [15] 刘洋, 李驰, 高瑜, 等. 碳化条件下循环流化床粉煤灰的水化性能[J]. *建筑材料学报*, 2024, 27(9): 837–845.

- LIU Yang, LI Chi, GAO Yu, et al. *J Build Mater*, 2024, 27(9): 837–845.
- [16] 张媛媛, 毛倩瑾, 李松涛, 等. 高吸水树脂作为混凝土内养护材料的研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(11): 3009–3020.
- ZHANG Yuanyuan, MAO Qianjin, LI Songtao, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2022, 50(11): 3009–3020.
- [17] LI B Y, DING T, QU C W, et al. Modification of fresh and hardened properties of 3D-printed recycled mortar by superabsorbent polymers[J]. *J Build Eng*, 2024, 95: 110189.
- [18] ELMASRY M E, KOTB A A, SHAABAN W M. Investigate the effect of curing methods for different types of binder concrete[J]. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*, 2024, 1396(3): 012006.
- [19] XU J T, QIN X, LIN Y K, et al. Research on performance deterioration of internally cured pavement concrete under the coupling effect of salt freeze-thaw[J]. *Polymers*, 2023, 15(3): 476.
- [20] LI K P, DU S W, ZENG J Y, et al. The influence of curing methods on the frost resistance and constitutive model of rubber-recycled concrete under seawater freeze-thaw cycles[J]. *Constr Build Mater*, 2024, 452: 138918.
- [21] 李洪攀, 刘琳, 韦悦. 冻融环境下水泥净浆吸水性能和微结构劣化[J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(5): 1302–1310.
- LI Hongpan, LIU Lin, WEI Yue. *J Chin Ceram Soc*, 2023, 51(5): 1302–1310.
- [22] DONG W, WANG J F, HANG M Y, et al. Research on printing parameters and salt frost resistance of 3D printing concrete with ferrochrome slag and aeolian sand[J]. *J Build Eng*, 2024, 84: 108508.
- [23] ZHOU R F, MAO H T, YANG S, et al. Research on mechanical properties and pore structure evolution process of steam cured high strength concrete under freeze thaw cycles[J]. *Sci Rep*, 2024, 14: 27530.
- [24] CHOI J S, HONG S H, YOO S J, et al. Effect of internal curing on shrinkage and creep of self-compacting lightweight concrete under different curing conditions[J]. *Constr Build Mater*, 2025, 470: 140612.
- [25] FU H, ZHANG M, LI G G, et al. Ion transportation properties of cement-based material under standard curing and steam curing[J]. *Adv Cem Res*, 2025, 37(4): 214–226.
- [26] 张钊睿, 罗素蓉, 林欣. 偏高岭土与石灰石粉增强3D打印水泥基材料的各向异性研究[J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43(5): 1651–1662.
- ZHANG Zhaorui, LUO Surong, LIN Xin. *Bull Chin Ceram Soc*, 2024, 43(5): 1651–1662.
- [27] 刘超, 王有强, 刘化威, 等. 基于打印参数影响的3D打印混凝土力学性能试验研究[J]. *材料导报*, 2023, 37(1): 84–90.
- LIU Chao, WANG Youqiang, LIU Huawei, et al. *Mater Rep*, 2023, 37(1): 84–90.
- [28] 王海龙, 陶傲, 孙晓燕. 应变率对3D打印混凝土抗压性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2024, 52(5): 1499–1507.
- WANG Hailong, TAO Ao, SUN Xiaoyan. *J Chin Ceram Soc*, 2024, 52(5): 1499–1507.
- [29] 夏丹, 黄培, 付宇彤, 等. 3D打印纳米碳填料/连续玄武岩纤维增强超混杂复合材料层间性能研究[J/OL]. *复合材料学报*, 2025: 1–12. (2025–06–16).<https://link.cnki.net/doi/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250616.002>.
- XIA Dan, HUANG Pei, FU Yutong, et al. *Acta Mater Compos Sin*, 2025: 1–12. (2025–06–16). <https://link.cnki.net/doi/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250616.002>.
- [30] 裴强, 杨雨航, 钟颖竹, 等. 玄武岩纤维对3D打印混凝土层间黏结性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2025, 44(7): 2465–2473.
- PEI Qiang, YANG Yuhang, ZHONG Yingzhu, et al. *Bull Chin Ceram Soc*, 2025, 44(7): 2465–2473.
- [31] 贾晓昱, 周峰, 刘显琼. 不同二次养护方法对混凝土透气性和孔结构特征的影响[J]. *水电能源科学*, 2024, 42(9): 102–105.
- JIA Xiaoyu, ZHOU Feng, LIU Xianqiong. *Water Resour Power*, 2024, 42(9): 102–105.
- [32] GU Y C, KHAYAT K H. Effect of superabsorbent polymer on 3D printing characteristics as rheology-modified agent[J]. *Constr Build Mater*, 2024, 438: 137140.
- [33] 陆建友, 吴成森, 常旭, 等. 岩石-混凝土界面冻融损伤劣化特性及断裂机制[J]. *建筑材料学报*, 2026, 29(1): 67–76.
- LU Jianyou, WU Chengsen, CHANG Xu, et al. *J Build Mater*, 2026, 29(1): 67–76.
- [34] 吕志涛, 赵志远, 蔡毅, 等. 单向冻融作用下砂岩力学各向异性演化与损伤模型[J]. *岩土力学*, 2025, 46(11): 3421–3430.
- LV Zhitao, ZHAO Zhiyuan, CAI Yi, et al. *Rock Soil Mech*, 2025, 46(11): 3421–3430.
- [35] WANG Q Y, MAO J H, SONG Z G, et al. A novel approach for modifying air-voids in concrete by short-term low-air pressure intervention[J]. *J Mater Res Technol*, 2024, 30: 1194–1206.
- [36] JIANG C H, WANG Y, OUYANG Y L, et al. Field exposure experiments on the influence of low air pressure environment on the air-void structure of air-entrained concrete and its deterioration mechanism[J]. *Constr Build Mater*, 2024, 453: 139067.
- [37] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete[J]. *J Proc*, 1945
- [38] GULER S, AKBULUT Z F, SIAD H, et al. Enhanced freeze-thaw resilience of cement mortars through Nano-SiO₂ and single/hybrid basalt fiber incorporation: Assessing workability, strength, durability[J]. *J Build Eng*, 2024, 89: 109177.
- [39] XIAO Q H, CAO Z Y, GUAN X, et al. Damage to recycled concrete with different aggregate substitution rates from the coupled action of freeze-thaw cycles and sulfate attack[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 221: 74–83.

作者贡献声明:

翟文辉: 负责研究方案设计、实验操作与数据采集, 完成数据分析及论文初稿撰写

马亚鹏: 参与实验过程, 协助数据整理与图表制作, 参与结果讨论

张东生: 参与理论分析, 提供技术指导, 对论文内容进行修改完善

朱 涛: 负责文献调研与资料整理, 协助部分实验工作

毛明杰: 指导研究思路, 参与论文修改与审核, 提供关键建议

杨秋宁: 指导整个研究过程, 提出核心研究思路, 最终审阅并定稿论文

Evolution Mechanism of 3D-Printed Solid Waste-Cement Mortar under Multi-Curing Regimes

ZHAI Wenhui¹, MA Yapeng¹, ZHANG Dongsheng^{1,2}, ZHU Tao¹, MAO Mingjie¹, YANG Qiuning¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. KU Leuven, Department of Civil Engineering, Campus Bruges, Bruges 8200, Belgium)

Extended Abstract

Introduction The appropriate curing methods for 3D-printed cement-based materials have not yet been clearly defined, thus restricting their durability in cold regions. This study was to investigate the effects of natural curing (NC), standard curing (SC), high-temperature curing (T_{60}), saturated $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution curing (SCH), and internal curing with absorbent polymer (SAP) on the performance of solid waste-based 3D printed mortar (3DFGCM). The objective was to establish quantitative relationships among curing methods, mechanical anisotropy, frost resistance, and pore structure, thereby providing a theoretical foundation for improving the service life of 3D printed structures in cold regions.

Methods The fly ash-slag-cement based mortar (FA : GGBS : OPC = 1 : 2 : 7) was prepared at a sand-to-binder ratio of 1 : 1 and a water-to-binder ratio of 0.3. After vibration casting and 3D printing of the slurry, the specimens were naturally cured for 1 day and then divided into five groups for further curing. The 28-d compressive strength and anisotropy were tested in the X , Y , and Z directions. After 28-d curing under respective conditions, the specimens were immersed in water at 15–20 °C for 2 d before undergoing freeze–thaw cycles. The mass loss rate, relative dynamic elastic modulus, and strength loss rate were measured. The pore structure was analyzed before and after freeze–thaw cycles to determine parameters such as air content, chord length distribution, and spacing factor. Finally, a damage evolution model based on the Weibull distribution was established to predict service life, and a neural network was used to map the relationship between pore parameters and damage.

Results and discussion This study systematically investigates the effect of curing method (*i.e.*, NC, SC, T_{60} , SCH, and SAP) on the performance of 3D printed fly ash-slag-cement-based mortar (3DFGCM). The comprehensive analysis of mechanical anisotropy, frost resistance, and pore structure, combined with freeze–thaw models and service life prediction models indicates that the 28-d compressive strength and isotropy coefficient of 3D printed specimens are lower than those of cast specimens. Among the curing methods, 3D-SC demonstrates the most significant enhancement in the 28-d compressive strength, while the SAP increases the 28-d compressive strength to 36.8 MPa, which is increased by 41.17%, compared to the NC group, with the lowest anisotropy coefficient (*i.e.*, 0.187). The frost resistance of 3D printed specimens varies significantly. The 3D-NC and 3D- T_{60} groups both fail after 125 freeze–thaw cycles, the 3D-SAP group exhibits the optimum frost resistance, retaining 61.5% of its dynamic elastic modulus and showing a mass loss of 4.57% after 150 freeze–thaw cycles. Its closed micropores and humidity balance mechanism effectively mitigate frost heave damage. In terms of the pore structure, 3D printed specimens exhibit distinct elliptical pores. The 3D-SCH group shows a limited improvement in cavity and interlayer cold joint defects, with large pores accounting for 75% more than those in the 3D-SAP group. The incorporation of SAP improves process-induced defects and significantly inhibits pore coarsening. With the relative dynamic elastic modulus as an index, the Weibull damage and service life prediction models are applied to assess freeze–thaw damage and service life of 3DFGCM, with R^2 of > 0.98 . The 3D-SAP group performs optimally, with a predicted service life of 15.9 years. Furthermore, based on BP neural networks, the effective correlations are established between pore structure parameters and the Weibull-predicted damage and service life, with R^2 of > 0.97 .

Conclusions In terms of mechanical anisotropy, the strength of 3D-printed specimens followed a decreasing order of Cast $> X > Z > Y$. The SAP curing resulted in the lowest anisotropy coefficient (*i.e.*, 0.187), with a 41.2% increase in the strength, compared to the NC group. For the frost resistance, after 150 freeze–thaw cycles, the SAP group retained 61.7% of its dynamic elastic modulus and exhibited only 4.57% mass loss. In contrast, the NC and T_{60} groups failed after 125 cycles due to pore coarsening. In terms of the pore structure, the initial air content of 3D-printed specimens was 1.5 times higher than that of cast specimens. After freeze–thaw cycles, the total chord length of the NC group was increased by 65.3%. The SAP effectively inhibited pore coarsening, with large pores accounting for only 36%, representing a 75% reduction, compared the NC group. Finally, a damage evolution equation was established based on the Weibull distribution model, predicting a service life of 15.9 years for 3D-SAP in cold northwestern regions. The BP neural networks were employed to predict damage and lifespan based on microscopic pore structure. This study could provide a reference for the design of methods and frost resistance optimization in 3D-printed construction materials.

Keywords 3D printing; curing regimes; pore structure; freeze–thaw damage life prediction; back propagation neural network