

裂后超高性能混凝土在冻融循环下拉伸性能演化

林 勋¹, 赵梦佳¹, 陈 璨¹, 张洪锐¹, 钟 锐¹, 王景全^{2,3}, 姚一鸣^{1,4}

(1. 东南大学土木工程学院, 南京 211189; 2. 江苏大学土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013;

3. 长大桥梁安全长寿与健康运维全国重点实验室, 南京 210096;

4. 黑龙江省寒地建筑科学研究院, 哈尔滨 150080)

摘 要: 超高性能混凝土(UHPC)因其优异的力学性能和耐久性已得到广泛应用。然而带有裂缝的 UHPC 结构在冻融循环作用下的长期服役性能仍存在安全隐患。当前研究多聚焦于无损 UHPC, 针对已产生损伤的 UHPC 在冻融作用下的性能退化机制仍缺乏系统研究。本工作系统探讨了冻融循环条件下裂后 UHPC 的拉伸性能演化机制。通过预拉伸试验使试件产生初始裂缝, 经历不同次数的冻融循环或不同龄期的水浴养护后, 对试件开展二次拉伸试验直至其破坏。结果表明: 水浴养护显著促进了 UHPC 的力学性能恢复, 形成的水化产物如水化硅酸钙凝胶和氢氧化钙, 有效填补了裂缝, 提升了基体的密实性, 达到了自愈合效果。在冻融循环的初期, UHPC 的裂缝愈合效果较为显著, 但在经过 300 次循环后, 裂缝扩展和基体劣化加剧, 导致力学性能显著下降。此外, 通过单纤维拔出试验揭示了界面粘结性能的变化规律, 微观测试进一步分析了二次水化和碳化反应在 UHPC 冻融过程中的作用机理。

关键词: 超高性能混凝土; 自愈合; 冻融循环; 拉伸性能

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)05-1236-11

网络出版时间: 2025-03-24



近年来, 中国大力推进基础设施建设, 尤其在公共交通、高速铁路和地下空间等领域取得了显著进展, 建设重点逐步向深海发展并向中西部地区转移。由于中国幅员辽阔, 许多地区处于高寒、复杂的地质和海洋环境中, 基础设施在服役期间常常受到冻融破坏的影响, 面临严峻挑战。在这些恶劣条件下, 开发并合理应用具备超高耐久性能的材料对于提升结构的长期服役能力和降低运营维护成本至关重要。

超高性能混凝土(UHPC)是一种具有优异力学性能和耐久性的先进水泥基复合材料, 尤其在无裂缝状态下表现突出^[1-2]。UHPC 广泛应用于道路、桥梁和水利工程等重大工程结构中, 能够适应各种复杂环境^[3-5]。然而, UHPC 易受早期自生收缩及恶劣环境诱发裂缝的影响。一旦裂缝形成, 有害离子渗透会加速钢纤维的腐蚀和基体的劣化, 威胁结构性能^[6-7]。由于 UHPC 通常采用极低的水胶比(<0.2)和

大量凝胶材料, UHPC 制品中存在大量未水化的水泥颗粒及火山灰活性材料。研究表明, 无论蒸汽养护或常规养护, 未水化颗粒含量均高达 50%以上^[8]。这些颗粒在裂缝形成后可能接触外界水分并继续发生水化, 填补受损区域, 促进自愈合和性能恢复^[9]。

现有理论认为 UHPC 的自愈合主要通过以下 4 种途径实现^[10-11]: 新生成的水化硅酸钙凝胶沉淀(C-S-H)吸附填充裂缝; 二次水化产物(如氢氧化钙 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及 C-S-H)生成; 碳化反应产生碳酸盐相的沉淀^[12]; 剥落基体物理堵塞裂缝和微孔, 降低孔隙渗透性。其中, 二次水化过程通常从裂缝内部开始, 产物与 UHPC 基体高度兼容。碳酸钙 CaCO_3 沉淀主要在裂缝表面生成, 在恢复力学性能和改变渗透性方面起着重要作用^[13]。裂缝的填充还进一步改变了内部离子浓度, 促进水化反应, 生成 C-S-H 凝胶和钙矾石^[14]。

近年来, 越来越多的研究探讨了 UHPC 的自愈

收稿日期: 2024-11-06。 修订日期: 2025-01-19。

基金项目: 国家自然科学基金(52278245); 中央高校基本科研业务费(2242023R40006)。

第一作者: 林 勋(1999), 男, 硕士研究生。

通信作者: 姚一鸣(1988), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2024-11-06. Revised date: 2025-01-19.

First author: LIN Xun (1999-), male, Master candidate.

E-mail: 220221354@seu.edu.cn

Correspondent author: YAO Yiming (1988-), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: yiming.yao@seu.edu.cn

合能力及其在恶劣环境中的性能恢复。Kim 等^[15]发现, 养护 14 d 后, UHPC 的首次开裂强度恢复率高达 36%。Guo 等^[16]报告称, 养护 28 d 后, 首次拉伸开裂应变恢复率达到 40%。然而, 当暴露在空气中时, 初始刚度下降, 并未观察到初始强度的提升。Ferrara 等^[17]通过四点弯曲试验评估了 UHPC 的自愈效果, 发现暴露条件和初始裂缝宽度对结果有显著影响。水分或蒸汽养护等条件有助于促进 UHPC 的二次水化反应^[18]。然而, 安明喆等^[19]指出, 由于 UHPC 基体的高度致密, 后期水化速率较慢, 可为新水化产物的生长提供的孔隙空间有限, 从而产生膨胀应力, 导致潜在的结构损伤。

在冻融循环过程中, 依据静水压和渗透压理论, 内部水分的结冰和迁移会导致混凝土产生微裂缝, 加速性能劣化。Gu 等^[20]研究发现, 弯曲荷载显著影响 UHPC 的抗冻性。Zhou 等^[21]研究了冻融损伤对 UHPC 直接拉伸性能的影响, 结果表明, 经过 300~1500 次冻融循环后, UHPC 的初裂强度、拉伸强度及应变能力均显著下降, 并且其拉伸应力-应变行为发生明显变化。谢瑞峰等^[22]通过纳米压痕技术研究了钢纤维与 UHPC 基体界面过渡区的微观结构及力学性能, 发现随冻融循环次数增加, 界面过渡区存在明显的薄弱带, 微观结构随冻融循环次数的增加而显著劣化。Smarzewski 等^[23]指出, 尽管 UHPC 样本展现出较好的抗冻性, 但经过 180 次冻融循环后, 试件表面出现裂缝, 且钢纤维发生了腐蚀, 尤其掺入 1% 体积分数钢纤维的 UHPC, 其质量损失比未掺纤维的 UHPC 高出 22.3 倍。张燕燕^[24]采用压汞法(MIP)、扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线计算机断层扫描研究了 UHPC 在冻融作用下的损伤, 发现在冻融作用后, UHPC 基体中砂浆界面处出现裂纹, 可见缺陷数量增加。Wang 等^[25]通过数字图像相关法(DIC)监测了 UHPC 试件在单轴拉伸和四点弯曲载荷下的开裂行为, 结果表明, 冻融条件下试件的塑性变形更加明显。

UHPC 在特定条件下展现了优异的自愈合和抗冻性能, 但不同的环境因素对其微观结构和力学性能仍产生显著影响。近年来的研究表明, UHPC 的自愈合能力得益于后期水化反应, 但其从性能恢复到再次劣化的转折条件在不同研究中存在差异, 具体的演变机制尚未完全明确。阚黎黎等^[26]对混杂钢纤维 UHPC 施加初始损伤(0.05%和 0.1%应变)并水浴养护 28 d, 结果表明 0.05%预损伤试件表现出良好的自愈合性能, 而 0.1%试件拉伸性能降低; 经过

短期冻融循环后, 拉伸强度有所提升但应变能力和耗能均降低。安明喆等^[27-28]研究表明, 在氯盐腐蚀与冻融循环共同作用下, 经历 1500 次冻融循环后 UHPC 的化学结合水含量增加了 11.3%, 水化速率与对照组相当。Lu 等^[29]发现, UHPC 的水胶比对其抗冻性能影响显著, 随着水胶比从 0.23 降低至 0.17, 抗压强度损失率从 27.5%降至 7.1%。

尽管 UHPC 的自愈合性能研究取得了重要进展, 但其自愈机制仍未完全明晰。关于裂缝或损伤后二次水化的研究结果存在不一致之处, 尤其在未水化水泥颗粒的后期水化作用及复杂微观结构对 UHPC 力学性能和耐久性影响方面, 尚未形成统一结论。

本工作旨在探讨冻融循环对裂后 UHPC 拉伸性能的影响。通过在狗骨形试件中引入初始损伤, 并在不同龄期下进行拉伸试验, 评估自愈合对拉伸性能恢复的作用。同时, 开展单纤维拔出试验, 记录钢纤维与 UHPC 基体界面粘结性能的变化。此外, 结合热重分析(TGA)及 SEM 测试, 进一步研究不同养护环境对 UHPC 基体及界面区微观结构的影响, 并验证二次水化反应在裂后 UHPC 拉伸性能演化中的作用, 为 UHPC 的在严酷服役条件下的应用提供理论依据。

1 实验

1.1 原材料与样品制备

原材料包括 52.5 级白水泥、硅灰、石英粉、石英砂、钢纤维、自来水及减水剂。其中, 52.5 级白水泥的熟料主要矿物成分及参数符合《白色硅酸盐水泥》(GB/T 2015—2017)标准, 具体相关参数详见表 1。硅灰外观呈现浅灰色、粉末状, 二氧化硅 SiO_2 含量为 92.4%(质量分数)。石英粉的中值粒径约为 $2.6\text{ }\mu\text{m}$, 石英砂的中值粒径约为 $300\text{ }\mu\text{m}$, SiO_2 含量 99.36%(质量分数), 三氧化二铁(Fe_2O_3)含量为 0.0481%(质量分数)。钢纤维的长度为 13 mm, 直径为 0.2 mm, 长径比为 65, 其抗拉强度达到 2500 MPa。高效减水剂为聚羧酸粉末减水剂, 外观为淡黄色粉末, 性能参数符合《聚羧酸系高性能减水剂》(JG/T 223—2017)规定。UHPC 的配合比见表 2, 其中钢纤维质量由 2%体积分数计算得出。

首先采用低速干搅拌, 使干粉料均匀分散。随后, 加入含减水剂的水, 并继续搅拌至形成均匀的水泥浆体。接着, 缓慢均匀地向 UHPC 浆体中添加石英砂, 并快速搅拌 5 min。最后缓慢均匀地加入钢

纤维，保持搅拌以确保均匀分布。新拌 UHPC 浇入模具后，表面覆盖一层塑料薄膜，并在室温静置 24 h。脱模后，试件在 90 ℃ 的热水中养护 48 h。

表 1 水泥熟料参数

Table 1 Composition of the employed cement w/%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	LOI
22.15	2.48	0.23	65.77	1.69	2.97	0.56	2.92

w is mass fraction.

表 2 UHPC 配合比参数

Table 2 Mixture proportion of UHPC

Water/ Binder ratio	Mix proportion/(kg·m ⁻³)						
	Cement	Silica fume	Quartz powder	Quartz sand	Water	Superplasticizer	Steel fiber
0.22	860	215	215	945	189	26	158

拉伸试验采用的狗骨试件尺寸为 30 mm×13 mm×80 mm，如图 1a 所示，每组制备 3 个样本。UHPC 在直接拉伸试验中往往为多裂缝开裂，采用裂缝宽度作为定量评估 UHPC 试件损伤和性能恢复的关键指标，通过双边切口直接拉伸试验(DENT)效诱导 UHPC 狗骨试件生成单一裂缝。在试验开始前，使

用金刚石线切割机在试件跨中的两端各预切 1 个 4 mm 深的切口。此外，单纤维拔出试件如图 1b 所示，试件的装置及尺寸参考《高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法》(JCT 2461—2018)，钢纤维埋深 6.5 mm，自由端长 6.5 mm。

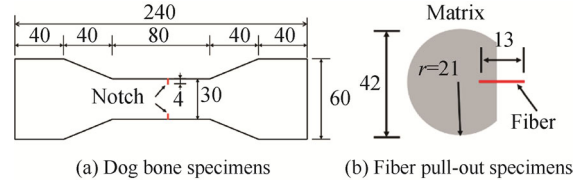


图 1 试件尺寸(单位: mm)

Fig. 1 Specimen size (unit: mm)

为进一步比较和分析，预损伤试件被分为冻融循环(FT)组和恒温水浴(W20)组，命名方式根据冻融循环次数或水浴养护时间确定。例如，FT-C100 表示经过 100 次冻融循环的试件，W20-D60 表示在 20 ℃ 水浴箱中养护 60 d 的试件，C0 为未进行任何损伤处理的对照组。在 W20 水浴环境中，同步设置了单纤维拔出试件。试验分组如表 3 所示。

表 3 试验分组

Table 3 Test groups

Group	Testing Condition	Pre-crack width/ μm	Duration/d	Temperature
C0				Room temperature
FT-C100	100 F-T cycles	100	20	(-17 $\pm$ 2) ℃ to (8 $\pm$ 2) ℃
FT-C200	200 F-T cycles	100	40	(-17 $\pm$ 2) ℃ to (8 $\pm$ 2) ℃
FT-C300	300 F-T cycles	100	60	(-17 $\pm$ 2) ℃ to (8 $\pm$ 2) ℃
W20-D14	Water bath	100	14	20 ℃
W20-D30	Water bath	100	30	20 ℃
W20-D60	Water bath	100	60	20 ℃

F-T is freeze-thaw.

1.2 UHPC 预裂-二次加载试验

UHPC 的 DENT 典型拉伸应力-应变曲线(见图 2)通常可分为 3 个阶段^[30]：弹性阶段、应变硬化阶段和软化阶段。

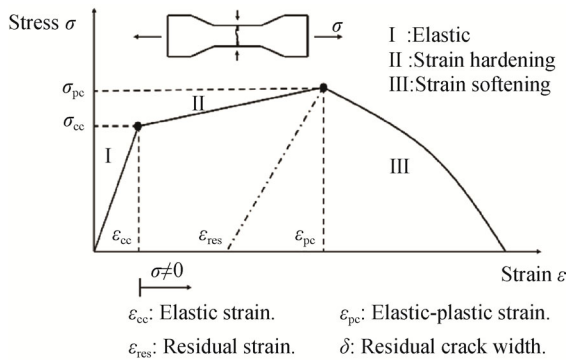


图 2 典型 UHPC 拉伸应力-应变曲线

Fig. 2 Typical tensile stress-strain curve of UHPC

根据作者的前期研究，当裂缝口位移(CMOD)达到 100~200 μm 的时，狗骨拉伸试件处于应变硬化阶段，且其残余裂缝宽度的离散性较小，表现出较为一致和稳定的特性。本工作将 CMOD 控制值设定为 100 μm ，即在预拉伸阶段加载至 100 μm 时卸载。

试验过程包括预拉伸(引入初始损伤)、水浴养护/冻融循环和二次拉伸(加载至破坏)3 个阶段。试验装置为微机控制电子万能试验机。在预拉伸阶段，使用 YY/J-4/10 型位移计记录 CMOD。试验采用位移控制，加载速率 0.4 mm/min。当 CMOD 达到 100 μm 时，调整位移控制速率至 -0.4 mm/min 进行卸载，并记录卸载后的裂缝残余宽度。在试件进行完全破坏的二次拉伸试验时，采用 CDP25 型引伸计(LVDT)记录试件测试段的位移数据，加载速率保持在 0.4 mm/min。图 3 为预拉伸—卸载—二次完全

加载全过程曲线的示意图。

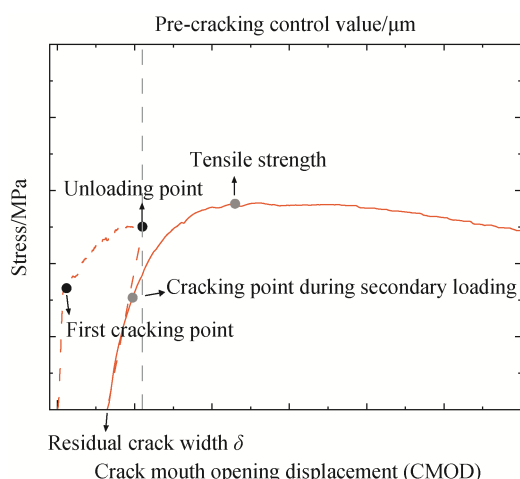


图 3 裂缝预加载及二次加载示意图

Fig. 3 Pre-cracking and secondary loading schematic

1.3 抗冻性试验

抗冻性试验参考《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2024), 采用快速冻法, 每次循环温度范围为 $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 d 完成 5~6 次循环。试件放置于 NJW-HDK-9 型快速冻融试验机, 每隔 50 次循环记录 UHPC 试件的饱和质量, 并每隔 100 次循环观察并记录试件的表观裂缝变化。

1.4 微观观测及水化产物分析

采用 Nova Nano SEM450 型扫描电子显微镜观察基体表面的水化产物以及纤维-基体界面的形貌。同时, 通过能量色散谱(EDS)分析该产物的元素组成。试样选取自裂缝区域, 并在异丙酮溶液中浸泡 24 h 以终止水化反应。随后, 将试样进行干燥处理, 并通过喷镀操作确保其在扫描电子显微镜下的成像质量。

热重分析(TGA)用于定量比较 UHPC 水化产物的变化。试样同样在异丙酮溶液中浸泡以终止水化反应, 之后经过研磨与筛分处理, 并置于真空干燥箱中保持干燥状态。使用 Netzsch TG209 F3 型热重分析仪在氮气环境下进行热重分析, 温度范围为 $30\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加热速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。在高温条件下, UHPC 中的水化产物会持续分解。通过计算每种物质及其摩尔质量对应的分解温度范围内的质量损失百分比, 可以推算出 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 以及 CaCO_3 的质量分数。

1.5 性能评估指标

为定量评估裂后 UHPC 在不同条件下的拉伸性能变化, 采用以下几种指标对损伤部位的恢复情况进行评价:

质量损失率 W : 记录试件初始的饱和质量 m_0 , 并在每隔 50 次循环时记录 UHPC 试件的饱和质量 m_n 。质量损失率可通过以下公式计算:

$$W = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

开裂强度恢复指标 R_c : 定义为二次加载的开裂应力 σ'_c 与预加载时的初裂应力 σ_c 之比。二次加载时开裂转折点不明显, 故利用直线逼近法寻找二次开裂的初裂点的应力 σ'_u 。

$$R_c = \frac{\sigma'_c}{\sigma_c} \times 100\% \quad (2)$$

拉伸强度恢复: R_u 为二次加载的峰值应力 σ'_u 与无损试件的峰值应力 σ_u 之比, 以反映 UHPC 的抗拉强度恢复情况。

$$R_u = \frac{\sigma'_u}{\sigma_u} \times 100\% \quad (3)$$

2 结果与讨论

2.1 裂缝开展与愈合

通过观察各组狗骨试件的预损伤裂缝形态, 分析了裂缝在冻融循环前后的表观变化情况(见图 4, 左侧图为预裂后状态, 右侧图为试验条件结束后)。结果显示, 不同处理条件下, 裂缝的形貌存在显著差异。

水浴组试件的裂缝闭合程度较高。在养护 30 d 时, 裂缝宽度逐渐减小, 至 60 d 时, 细微裂缝($<30\text{ }\mu\text{m}$)基本愈合, 裂缝表面可见白色填充颗粒物。相比之下, FT-C200 组试件裂缝宽度同样明显减小, 但填充物不明显, 可能是冻融循环影响了表观自愈合效果(见图 4b)。

如图 4c 所示, 随着冻融循环次数的增加, FT-C300 组试件表面出现明显剥落现象, 剥落处裂缝宽度较大, 浅层钢纤维逐渐暴露, 而试件的非裂缝区域未出现类似现象。这表明在 0~300 次冻融循环期间, 破坏主要集中在初始裂缝等薄弱部位, 整体结构的破坏尚未显现。

如图 5 所示, 随着冻融循环次数的增加, 试样的质量损失率由 0.1% 逐渐上升至 0.4%, 呈现轻微增加的趋势。这一现象可归因于在冻融循环过程中裂缝薄弱部位的基体发生剥落, 导致一定的质量损失。同时, UHPC 狗骨试件的微裂缝持续吸水, 为内部的水化反应提供了有利的环境, 这一过程在一定程度上弥补了损失的质量^[31]。因此, 在 300 次冻融循环过程中, 试样总体质量变化较小, 质量损失率始终保持在 0.5% 以下。

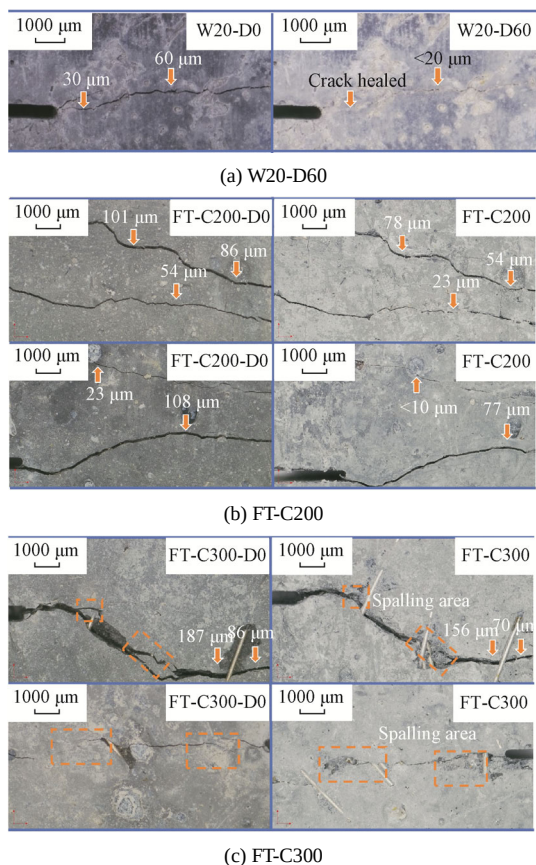
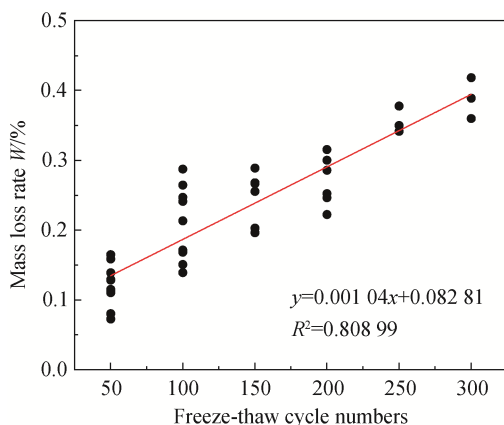


图4 冻融循环前、后 UHPC 样品的裂缝形态

Fig. 4 Crack morphology photos of UHPC samples before and after freeze-thaw cycles

图5 质量损失量 W 与冻融循环次数的关系Fig. 5 Relationship between mass loss rate W and freeze-thaw cycle numbers

2.2 冻融循环对抗拉性能的影响

预拉伸试验的荷载-CMOD 曲线(见图 6)显示, 各组试件的弹性模量、初裂强度和拉伸强度接近。裂缝的平均残余宽度为 $71.2 \mu\text{m}$, 标准差为 $8.41 \mu\text{m}$ 。

图 7 为二次加载 UHPC 试件的拉伸曲线, 其中黑色实线为无损对照组 C0。图 8 为拉伸和开裂强度的恢复情况。各试验组的二次加载曲线表现出显著

差异。W20 组的抗拉强度高于对照组 C0, 并且随着时间的推移显著增强。经过 14 d 水浴养护后, 预裂的 UHPC 试件强度恢复至无损水平。在 30 d 时, 相较于无损组提高了 15%; 60 d 时, 拉伸强度达到 15.5 MPa , 超过无损组 32%。这一结果与裂缝观测结果一致, 表明水浴条件下 UHPC 的二次水化作用明显, 自愈合作用有效减小了裂缝宽度并填充了微裂缝, 从而持续提升拉伸强度。

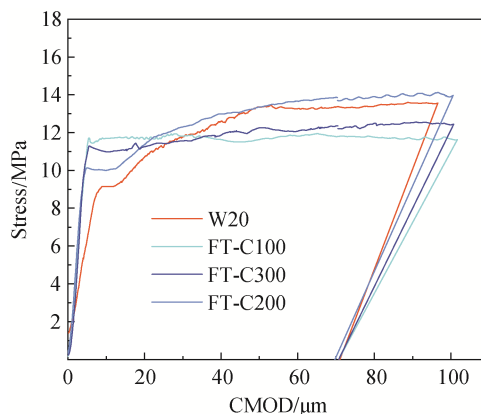


图6 预加载荷载与裂缝位移曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of strain-crack displacement in pre-tensile stage

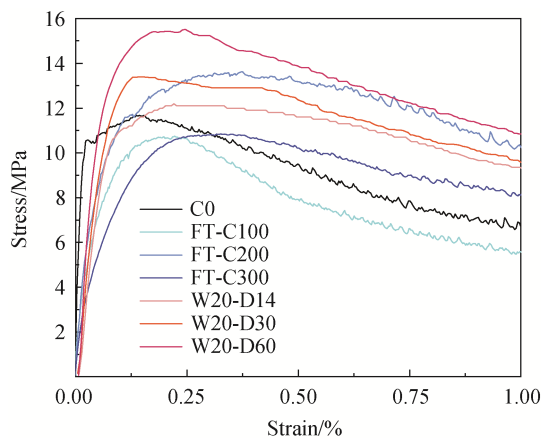


图7 二次加载 UHPC 试件的拉伸应力-应变曲线

Fig. 7 Tensile stress-strain curves of UHPC samples at secondary loaded

相比之下, FT 组的二次加载曲线更加平滑, 弹性模量较低, 未见明显的二次开裂点, 表明基体恢复程度相对较低。已有研究表明, UHPC 在低温下仍会发生二次水化反应, 从而产生更致密的基体^[28]。100 次冻融循环时预裂的 UHPC 强度较低。经过 200 次循环时, 拉伸强度达到最大值, 高于参考试件 14%。由于此时观测到裂缝宽度显著减小且表面未见剥落损伤, 说明试件可能在低温下发生自愈合, 二次水化产物有效地修复了裂缝, 且冻融循环的劣

化影响尚不明显, 因此试件的拉伸性能出现恢复。FT-C300 组的强度与 FT-C100 组相近, 但 300 次冻融循环后表面基体出现部分剥落, 表明冻融循环的劣化作用显现, 冻胀作用对 UHPC 基体的破坏逐渐积累, 导致基体微裂纹扩展和连通。这种累积劣化作用最终超过了自愈合作用, 导致基体整体性能下降(见表 4)。

根据预拉伸与二次拉伸曲线, 计算得出的开裂

强度恢复指数 R_c 结果如图 8 所示。UHPC 的开裂强度在很大程度上依赖于基体的性能^[32]。预裂之前基体完整, 预加载曲线可见清晰的开裂点。开裂之后, 微裂缝周围出现基体薄弱区。已有研究^[19, 28]表明, UHPC 在养护过程中会继续发生水化和二次水化反应, 生成的水化产物能够填充微裂缝并与基体结合。因此, 二次加载时的开裂强度能够反映损伤区域新生成水化产物的强度及其与原始基体的结合能力。

表 4 拉伸试验结果

Table 4 Results of tensile tests

Group	First cracking σ_c /MPa	Secondary cracking σ_c /MPa	Tensile strength σ_t /MPa	Crack strength recovery R_c /%	Tensile strength recovery R_t /%
C0	11.52		11.67		
FT-C100	11.67	10.44	10.75	89.5	92.1
FT-C200	10.63	10.43	13.33	98.1	114.2
FT-C300	11.17	10.13	10.85	90.7	92.9
W20-D14	11.72	10.90	12.20	93.0	104.5
W20-D30	13.35	13.37	13.39	100.2	114.7
W20-D60	13.64	13.98	15.30	102.5	131.1

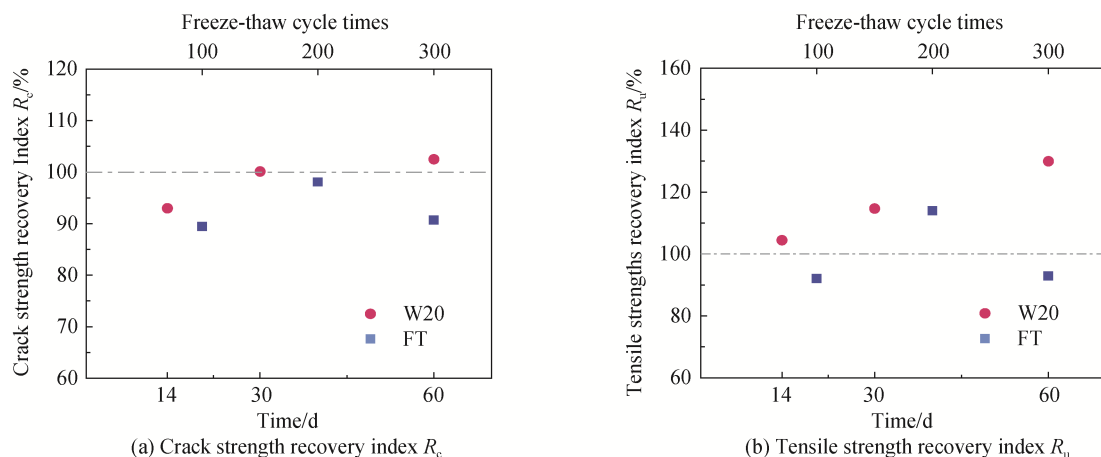


图 8 二次加载后 UHPC 试样的拉伸和开裂强度恢复情况

Fig. 8 Tensile and cracking strengths recovery of UHPC samples after secondary loaded

从试验结果来看, W20 组的开裂强度随着水浴养护时间的增加逐渐恢复。到第 30 d 时, W20 组的开裂强度基本恢复, 此后强度提升趋于平缓, 表明前 30 d 生成的水化产物与基体的结合程度较高, 有效恢复了试件的开裂强度。相比之下, FT 组的二次开裂强度显著低于初裂强度, 这表明冻融循环对水化产物与基体结合强度产生了一定的劣化作用, 导致 FT 组的二次开裂强度恢复不如 W20 组。

综上所述, 冻融循环和养护条件对 UHPC 的裂缝愈合及抗拉性能有显著影响。水浴组表现出更好的自愈合能力和强度恢复, 冻融循环组则受损明显, 特别是在 300 次循环后, 强度和弹性模量明显下降。

2.3 水浴环境对单纤维-基体界面的影响

图 9 为单根纤维试件的预拔出及完全拔出曲线, 其中完全拔出曲线能够反映纤维-基体界面的粘结强度及单根纤维拔出耗能情况。试验结果显示, 各组试件的预加载曲线基本一致。在养护 14 d 时, 界面粘结强度和拔出耗能为最低值, 表明试件经历预拔出后, 界面损伤尚未恢复; 至 30 d 时, 纤维拔出荷载超过初始值, 表明界面粘结性能得到有效提升。随着界面粘结性能的提高, 裂后拉伸性能明显改善, 裂缝扩展后的能量耗散能力也得到增强。然而, 由于 30 d 后钢纤维开始出现不同程度的锈蚀, 拔出曲线出现下降趋势, 纤维的抗拔性能和界面粘结性能下降。60 d 时钢纤维锈蚀明显, 部分纤维的

破坏模式从拔出转变为断裂, 这种界面劣化直接导致试件裂后拉伸性能下降(见图 10a)。

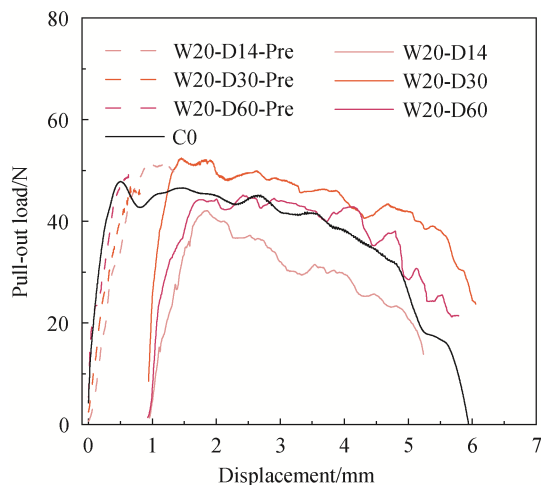


图 9 单纤维拔出曲线

Fig. 9 Pull-out curves of single fiber

与单纤维试件不同, 在 UHPC 拉伸试件中, 纤维界面并非完全暴露于水浴环境, 因此纤维-基体界面的演化相对较为缓慢。即使到了 60 d 时, 内部纤维-基体界面可能仍处于逐步恢复和增强的阶段^[33–34], 拉伸性能持续提高(见图 7)。

观察完全拉伸后的冻融循环试件, 冻融循环 100 次时, 纤维与液态水的接触时间较短, 因而锈蚀程度较轻(见图 10b)。然而, 随着冻融循环次数增加至 300 次, 基体表面出现剥落, 这增加了纤维与水的接触时间和接触面积, 从而加剧了纤维的锈蚀程度, 导致其抗拉性能显著下降。

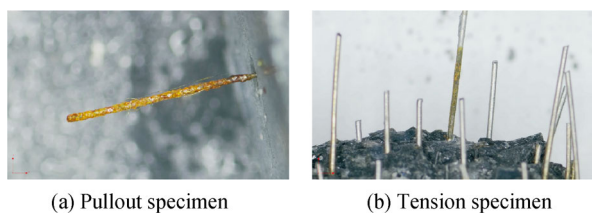


图 10 冻融循环 100 次后 UHPC 中钢纤维锈蚀状态

Fig. 10 Rust of steel fibers in UHPC after freeze-thaw for 100 cycles

2.4 微观测试

2.4.1 微观形貌与产物分析

根据力学试验结果, 取出不同组试件裂缝处的基体, 利用扫描电子显微镜对基体愈合产物及纤维-基体界面的形貌进行观测分析。在放大 5000 倍时, C0 试件中可清晰观察到较多的孔隙和裂缝, 且基体表面水化产物较少, 显示出基体较为疏松的微观结

构。经过预加载和二次加载后, W20-D14 试件的基体微观结构变得更加松散, 裂缝显著扩展, 表明该阶段裂缝尚未得到有效愈合。相比之下, W20-D30 试件的微观结构则显得更为致密, 裂缝宽度有所减小, 并且裂缝周围逐渐出现了立方体状的水化产物, 显示出一定的自愈合作用。随着水浴养护时间的延长, W20-D60 试件的基体结构愈发致密。在放大 10 000 倍时, 可以清晰看到细小的裂缝已被晶体状的水化产物填充, 裂缝几乎完全闭合。总的来说, 随着水浴养护时间的延长, UHPC 基体结构显著致密化, 微裂缝宽度缩小, 纤维-基体界面逐渐被晶体状的水化产物填充, 有效提升了界面的结合强度。这与宏观力学性能的提升相一致, 表明水化产物的生成和裂缝愈合在提升材料整体性能中发挥了关键作用。

纤维-基体界面通常是基体最薄弱的区域。图 12 为 FT 组纤维-基体界面的 SEM 照片。观察 FT-C100 试件, 可以发现损伤基体周围的 C、Si、Ca 等元素含量较高, 这表明界面区存在二次水化产物 C-S-H 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。然而, 钢纤维与基体的结合程度较差, 纤维与基体之间存在明显的间隙。

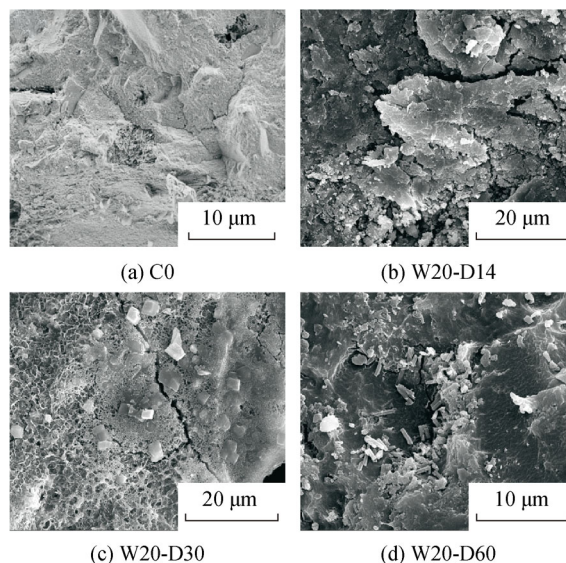


图 11 20 °C 水浴作用后 UHPC 基体的 SEM 照片

Fig. 11 SEM observation of UHPC matrix after water curing at 20 °C

在 FT-C200 试件中, 纤维-基体界面的结合更加紧密, 基体中微裂缝较少。通过 EDS 分析发现, 钢纤维表面水化产物中的 Ca 和 O 元素含量较高, 而 Si 含量略低, 存在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 以及 CaCO_3 。此时, 钢纤维的完整性较好, 且锈蚀程度轻微。由图 4 可见, FT-C200 试件的表观裂缝闭合程度较高, 因此表明在此阶段自愈合作用发挥了良好的效果。

FT-C300 试件界面逐渐显现冻融循环的破坏作用, 纤维-基体界面重新出现了基体裂缝。纤维表面的 Si 含量增加, 表明可能生成了更多的 C-S-H 水化产物。通过 SEM 和 EDS 分析发现, 尽管在冻融循环过程中界面周围通过水化反应生成了一定的水化

产物, 但随着冻融循环次数的增加, 基体周边裂缝重新开展, 出现界面薄弱区, 降低了界面的强度。这一微观观测结果与力学试验的结果一致, 表明冻融循环对 UHPC 的劣化影响逐渐超越了自愈合作用的正面效应。

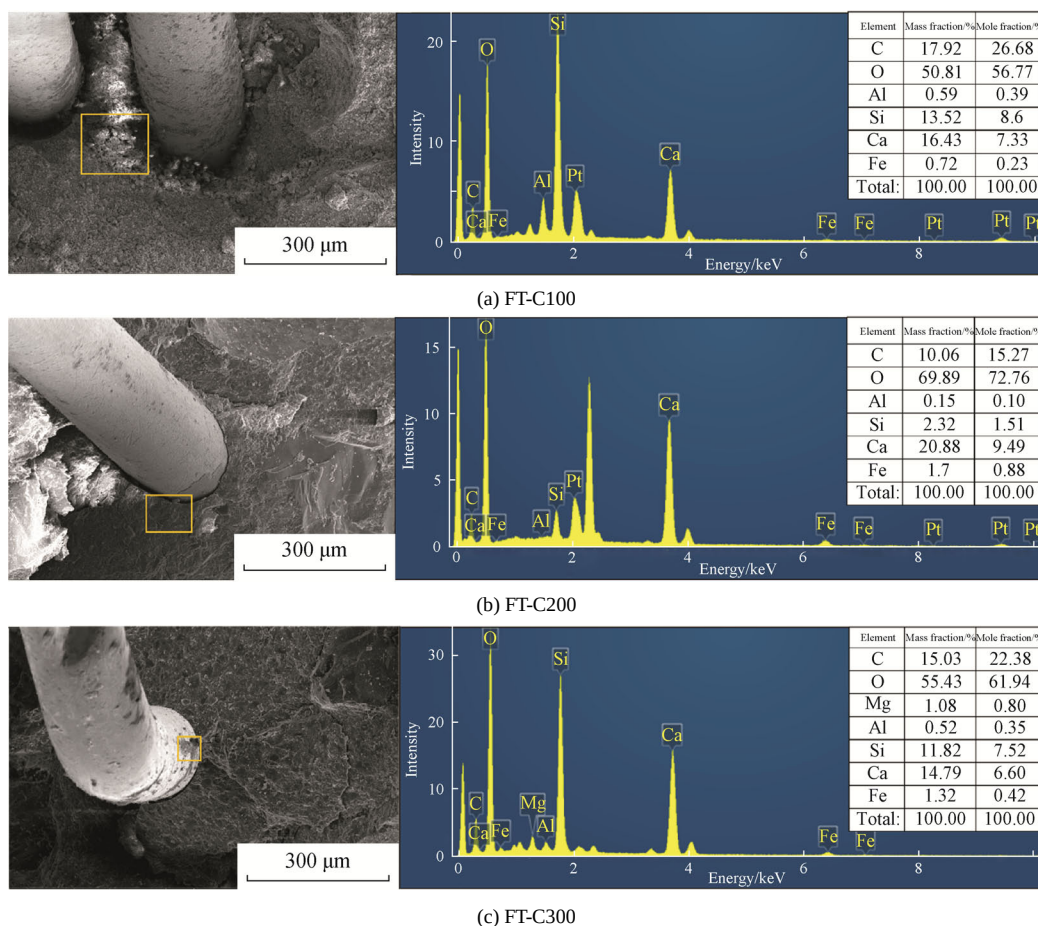


图 12 冻融循环试件纤维-基体界面 SEM 与 EDS 分析
Fig. 12 SEM and EDS analysis of fiber-matrix interface

2.4.2 热重产物分析

在拉伸试验结束后, 对预裂缝附近的基体取样, 通过热重测试比较二次水化产物的相对含量。图 13 展示了不同试验组的 TG/DTG 曲线, DTG 曲线呈现出 3 个明显的峰值^[35-36]: 1) 峰 1 出现在 30~200 °C 之间, 主要反映了 C-S-H 和钙矾石的脱水过程。2) 峰 2 出现在 380~480 °C 之间, 对应的是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的分解。3) 峰 3 出现在 600~750 °C 之间, 反映了 CaCO_3 的分解。根据 TG/DTG 曲线分析, 相较于对照组, 各实验组的 DTG 曲线在峰 1 范围内明显, 表明 C-S-H 凝胶均有明显的生成。

W20 组样品的热重分析结果表明, 水化产物 C-S-H 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量显著高于初始值。随着水

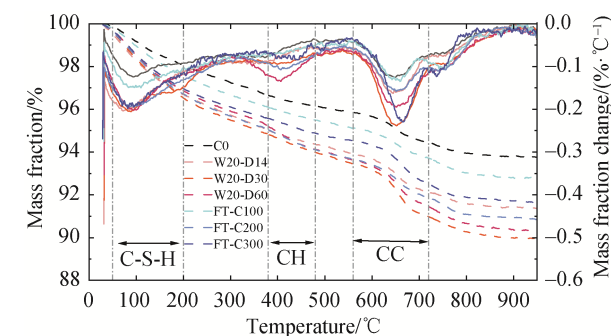


图 13 预裂缝附近样品的 TG/DTG 曲线
Fig. 13 TG/DTG curves of samples near pre-cracks

浴养护时间的增加, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量不断增加, 而 CaCO_3 含量则呈现出先增加后略微下降的趋势。这

表明,在水浴养护的 60 d 内,适宜的温度和水环境有效促进二次水化反应持续发生, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的生成速度高于碳化反应及火山灰反应的消耗速度,因此 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 持续积累。

相比之下,经过相同实验时间,FT 组样品的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 CaCO_3 总含量低于 W20 组。其 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量呈现先增加后下降的趋势,且 C-S-H 凝胶生成量相比其他组并无明显提升,表明冻融循环对二次水化反应的效率产生了负面影响。

综上所述,水浴环境显著促进了水化产物的生成,并加速碳化反应,冻融循环条件则对基体的水化和碳化过程产生了负面影响。

为了更清晰地说明 UHPC 裂后性能演化的机理,图 14 为持续水化、二次水化和碳化反应的具体过程示意图。首先,UHPC 中的微裂缝为外界的水分子和二氧化碳提供了进入基体的通道。UHPC 组分中的硅灰有较高的火山灰活性,其主要成分 SiO_2

会与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化反应,生成 C-S-H 凝胶。此外,未完全水化的水泥颗粒也会持续生成水化产物,从而促进裂缝内部的自愈合。水化反应持续进行时,进入裂缝中的碳酸根离子(CO_3^{2-})会与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生碳化反应,形成 CaCO_3 沉淀,进而在裂缝口周围填充裂缝并增强基体的密实性。因此,裂缝内部形成了与基体结合良好的二次水化产物,裂缝口周围则存在 CaCO_3 ,有效地堵塞了裂缝通道。二者共同作用于自愈合过程,从而促进了开裂 UHPC 的拉伸性能恢复,已有研究^[6-7, 16, 37]同样证实,二次水化反应和碳化反应是 UHPC 基体实现自愈合的关键因素。因此,水浴环境下 UHPC 力学性能能够持续恢复甚至提升。200 次冻融循环下试件力学性能的部分恢复同样可能来自低温自愈合^[28, 37],然而冻融环境阻碍了水和二氧化碳的持续供应,从而影响水化和碳化反应,在 300 次循环时冻融破坏作用加剧,最终导致试件力学性能下降。

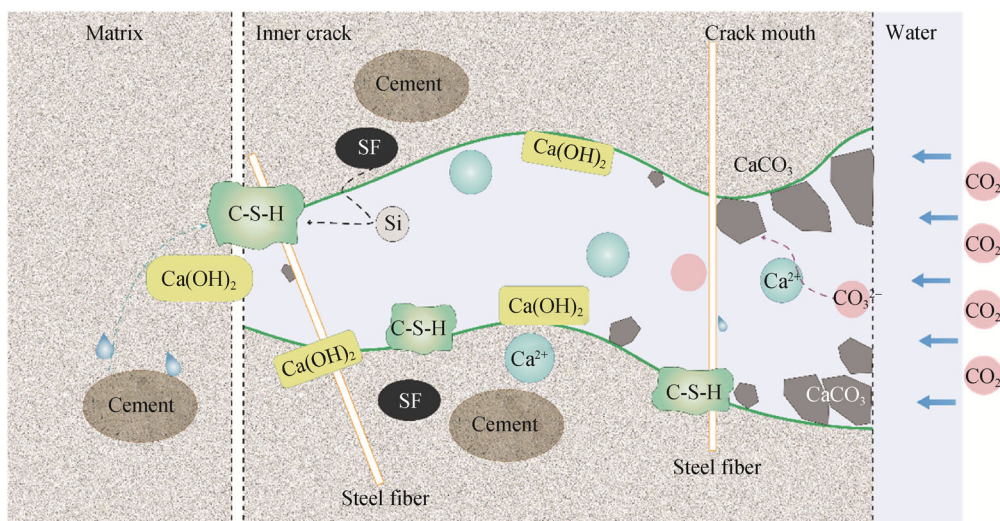


图 14 UHPC 自愈合机制示意图

Fig. 14 Schematic diagram of UHPC self-healing mechanism

3 结论

1) UHPC 试样在水浴环境中显示出较高的裂缝闭合率,表明水浴环境有效促进 UHPC 自愈合能力,从而填充裂缝并恢复拉伸性能。而在冻融循环条件下,水化产物生成减少,试件表面的薄弱区域出现集中破坏,导致基体剥落和裂缝扩大。

2) 在水浴环境中,单纤维试件的纤维-基体界面粘结强度在 30 d 内可完全恢复,但之后钢纤维开始锈蚀。在开裂试件中的界面粘结强度变化变缓。

3) 微裂缝为二次水化反应提供了水分通道,促进了后期水化。尽管预加载后 UHPC 的力学性能迅

速下降,但水浴养护后,裂缝充分愈合并在 30 d 内恢复至无损状态。200 次冻融循环后试件的拉伸性能接近无损组,但 200~300 次冻融循环期间,冻融破坏作用超过愈合程度,拉伸性能下降。

4) 微观结构的演变体现了水化产物在修补裂缝和改善基体完整性方面的作用。水浴环境促进 UHPC 的持续水化和二次水化,水化产物填充裂缝,增强自愈合能力。部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碳化生成 CaCO_3 ,进一步填充裂缝并提升密实性。SEM 分析表明,水浴养护样本具有更致密的微观结构和更小的裂缝尺度,而冻融循环则引起界面区裂缝进一步开裂和扩展。

参考文献:

- [1] SHI C, WU Z, XIAO J, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design[J]. *Constr Build Mater*, 2015, 101: 741–751.
- [2] 邵旭东, 樊伟, 黄政宇. 超高性能混凝土在结构中的应用[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(1): 1–13.
SHAO Xudong, FAN Wei, HUANG Zhengyu. *China Civ Eng J*, 2021, 54(1): 1–13.
- [3] 樊健生, 丁然. 超高性能混凝土在房屋建筑结构中的研究与应用进展[J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(5): 1246–1258.
FAN Jiansheng, DING Ran. *J Chin Ceram Soc*, 2023, 51(5): 1246–1258.
- [4] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(2): 1–97.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. *China J Highw Transp*, 2021, 34(2): 1–97.
- [5] 黎维良. 超高性能混凝土材料在桥梁工程中的应用[J]. *合成材料老化与应用*, 2023, 52(1): 147–149.
LI Weiliang. *Synth Mater Aging Appl*, 2023, 52(1): 147–149.
- [6] XI B, AL-OBAYDI S, FERRARA L. Effect of different environments on the self-healing performance of ultra high-performance concrete—A systematic literature review[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 374: 130946.
- [7] ZHENG Q M, LI C, SONG F C, et al. Autogenous self-healing of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete with varying silica fume dosages: Secondary hydration and structural regeneration[J]. *Cem Concr Compos*, 2023, 137: 104905.
- [8] 葛晓丽, 刘加平, 王育江, 等. 未水化水泥颗粒后期水化对 UHPC 性能的影响[J]. *土木建筑与环境工程*, 2016, 38(1): 40–45.
GE Xiaoli, LIU Jiaping, WANG Yujiang, et al. *J Civ Archit Environ Eng*, 2016, 38(1): 40–45.
- [9] ALDEA C M, SONG W J, POPOVICS J S, et al. Extent of healing of cracked normal strength concrete[J]. *J Mater Civ Eng*, 2000, 12(1): 92–96.
- [10] DE ROOIJ M, VAN TITTELBOOM K, DE BELIE N, et al. Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013.
- [11] 郑乔木, 何倍, 李晨, 等. 超高性能混凝土裂缝自愈合研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(11): 2450–2461.
ZHENG Qiaomu, HE Bei, LI Chen, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2021, 49(11): 2450–2461.
- [12] ALEX A, FREEMAN B, JEFFERSON A, et al. Carbonation and self-healing in concrete: Kinetic Monte Carlo simulations of mineralization[J]. *Cem Concr Compos*, 2023, 144: 105281.
- [13] YILDIRIM G, KESKIN Ö K, KESKIN S B, et al. A review of intrinsic self-healing capability of engineered cementitious composites: Recovery of transport and mechanical properties[J]. *Constr Build Mater*, 2015, 101: 10–21.
- [14] SISOMPHON K, COPUROGLU O, KOENDERS E A B. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive[J]. *Cem Concr Compos*, 2012, 34(4): 566–574.
- [15] KIM D J, KANG S H, AHN T H. Mechanical characterization of high-performance steel-fiber reinforced cement composites with self-healing effect[J]. *Materials*, 2014, 7(1): 508–526.
- [16] GUO J C, WANG J Y, WU K. Effects of self-healing on tensile behavior and air permeability of high strain hardening UHPC[J]. *Constr Build Mater*, 2019(20): 342–356.
- [17] FERRARA L, KRELANI V, MORETTI F, et al. Effects of autogenous healing on the recovery of mechanical performance of high performance fibre reinforced cementitious composites (HPFRCCs): Part 1[J]. *Cem Concr Compos*, 2017, 83: 76–100.
- [18] XU D S, TANG J H, HU X, et al. The influence of curing regimes on hydration, microstructure and compressive strength of ultra-high performance concrete: A review[J]. *J Build Eng*, 2023, 76: 107401.
- [19] 安明喆, 刘亚州, 张戈, 等. 再水化作用对超高性能混凝土基体显微结构和水稳定性的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(11): 1722–1731.
AN Mingzhe, LIU Yazhou, ZHANG Ge, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2020, 48(11): 1722–1731.
- [20] GU C P, SUN W, GUO L P, et al. Effect of curing conditions on the durability of ultra-high performance concrete under flexural load[J]. *J Wuhan Univ Technol Mater Sci Ed*, 2016, 31(2): 278–285.
- [21] ZHOU Z D, QIAO P Z. Durability of ultra-high performance concrete in tension under cold weather conditions[J]. *Cem Concr Compos*, 2018, 94: 94–106.
- [22] 谢瑞峰, 陆林军, 乔丕忠. 冻融循环作用下超高性能混凝土界面过渡区微观力学性能劣化研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2018, 48(10): 1092–1102.
XIE Ruifeng, LU Linjun, QIAO Pizhong. *Sci Sin Technol*, 2018, 48(10): 1092–1102.
- [23] SMARZEWSKI P, BARNAT-HUNEK D. Effect of fiber hybridization on durability related properties of ultra-high performance concrete[J]. *Int J Concr Struct Mater*, 2017, 11(2): 315–325.
- [24] 张燕燕. 冻融作用下超高性能混凝土微观结构损伤研究[J]. *混凝土*, 2023(10): 221–224.
ZHANG Yanyan. *Concrete*, 2023(10): 221–224.
- [25] WANG F, KAN L L, YU J T, et al. Systematic studies on behaviors of ultra-high performance concrete subject to freezing and thawing cycles combining DIC technology[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 388: 131580.
- [26] 阚黎黎, 乔宏卓, 王飞, 等. 超高性能混凝土的自愈合及抗冻性能[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(4): 2251–2260.
KAN Lili, QIAO Hongzhuo, WANG Fei, et al. *Acta Mater Compos Sin*, 2023, 40(4): 2251–2260.
- [27] 安明喆, 王华, 王月, 等. 活性粉末混凝土在海水冻融作用下的耐久性[J]. *中国铁道科学*, 2018, 39(2): 1–9.
AN Mingzhe, WANG Hua, WANG Yue, et al. *China Railw Sci*, 2018, 39(2): 1–9.
- [28] AN M Z, WANG Y, YU Z R. Damage mechanisms of ultra-high-performance concrete under freeze-thaw cycling in salt solution considering the effect of rehydration[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 198: 546–552.
- [29] LU Z, FENG Z G, YAO D D, et al. Freeze-thaw resistance of ultra-high performance concrete: Dependence on concrete composition[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 293: 123523.
- [30] 崔冰, 王景全, 刘加平. UHPC 桥梁研究进展与规模化应用技术路径分析[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(9): 1–19.
CUI Bing, WANG Jingquan, LIU Jiaping. *China J Highw Transp*, 2023, 36(9): 1–19.
- [31] WU C J, MA Z P, WANG D Z, et al. Influence in the mechanical properties and salt erosion resistance of recycled sand UHPC made from fly ash content[J]. *J Build Eng*, 2024, 96: 110337.
- [32] KAN L L, WANG F, ZHANG Z, et al. Mechanical properties of high ductile alkali-activated fiber reinforced composites with different curing ages[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 306: 124833.
- [33] YOO D Y, SHIN W, CHUN B, et al. Assessment of steel fiber corrosion in self-healed ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and its effect on tensile performance[J]. *Cem Concr Res*, 2020, 133: 106091.
- [34] YOO D Y, SHIN W, BANTHIA N. Corrosion of partially and fully debonded steel fibers from ultra-high-performance concrete and its influence on pullout resistance[J]. *Cem Concr Compos*, 2021, 124: 104269.
- [35] VEDALAKSHMI R, SUNDARA RAJ A, SRINIVASAN S, et al. Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique[J].

Thermochim Acta, 2003, 407(1/2): 49–60.

[36] TRIVEDI S S, SARANGI D, DAS B B, et al. Influence of multi-stage processing and mechano-chemical treatments on the hydration and microstructure properties of recycled aggregate concrete[J]. Constr

Build Mater, 2023, 409: 133993.

[37] ZHONG R, AI X B, PAN M Y, et al. Durability of micro-cracked UHPC subjected to coupled freeze-thaw and chloride salt attacks[J]. Cem Concr Compos, 2024, 148: 105471.

Tensile Performance Evolution of Cracked Ultra-High-Performance Concrete Under Freeze–Thaw Conditions

LIN Xun¹, ZHAO Mengjia¹, CHEN Can¹, ZHANG Hongrui¹, ZHONG Rui¹, WANG Jingquan^{2,3}, YAO Yiming^{1,4}

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China;

3. State Key Laboratory of Safety, Durability and Healthy Operation of Long Span Bridges, Nanjing 210096, China;

4. Heilongjiang Province Academy of Cold Area Building Research, Harbin 150080, China)

Extended Abstract

Introduction Ultra-High Performance Concrete (UHPC) is widely recognized for its exceptional mechanical properties and durability, making it a cornerstone material in modern infrastructure projects. However, the long-term service performance of UHPC structures with initial cracks under freeze–thaw (F–T) cycling remains a safety concern, particularly in harsh environments such as cold regions and coastal zones. While extensive research has focused on the properties of uncracked UHPC, the study on degradation of cracked UHPC under coupled F–T cycling and self-healing conditions is limited. Existing studies highlight UHPC’s intrinsic self-healing potential through secondary hydration and carbonation reactions, yet the interplay between these healing mechanisms and cyclic F–T-induced deterioration remains unclear. To address this, the present study investigates the tensile performance evolution of pre-cracked UHPC under F–T cycling and water-curing conditions. By integrating macroscopic mechanical tests with microscopic analyses, this work aims to unravel the dual effects of self-healing and F–T-induced damage on UHPC’s structural integrity.

Methods UHPC specimens were prepared using white cement, silica fume, quartz powder/sand, steel fibers (2% by volume), and a polycarboxylate superplasticizer. The mix design followed a water-to-binder ratio of 0.22. After casting and demolding, specimens underwent 48 h hot-water curing at 90 °C. Dog-bone-shaped specimens (30 mm×13 mm×80 mm) were pre-notched and subjected to pre-tensioning to introduce controlled initial cracks (100 µm width) via displacement-controlled loading. Pre-cracked specimens were divided into two groups, including 1) F–T cycling groups: Exposed to 100, 200, or 300 F–T cycles (–17 °C to 8 °C per cycle); 2) water-curing groups: immersed in 20 °C water for 14, 30 d, or 60 d. Secondary tensile tests were conducted to evaluate residual strength and crack recovery. Single-fiber pull-out tests assessed interfacial bond performance, while scanning electron microscopy (SEM) and thermogravimetric analysis (TGA) characterized microstructural evolution and hydration products.

Results and discussion Water-cured specimens exhibited remarkable mechanical recovery. After 60 d, tensile strength exceeded the undamaged control group by 32%, attributed to C–S–H gel and Ca(OH)₂ filling microcracks. SEM revealed dense microstructures with nearly closed cracks, confirming the role of secondary hydration in enhancing matrix integrity. Single-fiber pull-out tests showed interfacial bond strength fully recovered within 30 d, though prolonged immersion led to steel fiber corrosion, reducing post-peak ductility. F–T cycling initially promoted low-temperature self-healing. After 200 cycles, tensile strength increased by 14% due to partial crack closure via hydration. However, beyond 300 cycles, cumulative damage dominated: surface spalling, fiber corrosion, and interfacial debonding caused a 7.1% decline in tensile strength. TGA confirmed reduced Ca(OH)₂ and CaCO₃ content under F–T conditions, indicating suppressed hydration and carbonation compared to water curing. Progressive densification of the matrix with crystalline hydration products sealing cracks. Initial healing at 100–200 F–T cycles was counteracted by interfacial microcrack propagation and fiber-matrix debonding at 300 cycles. EDS analysis highlighted localized CaCO₃ precipitation at crack surfaces, insufficient to offset F–T-induced damage. The study revealed a critical threshold (200 F–T cycles) where self-healing and deterioration mechanisms compete. While water ingress facilitates secondary hydration, prolonged F–T exposure disrupts the healing process through ice crystallization pressure and moisture redistribution, exacerbating matrix degradation.

Conclusions Water curing significantly enhances UHPC’s self-healing capacity, with complete tensile strength recovery, which was driven by continuous secondary hydration and carbonation, forming dense, crack-resistant matrices. Freeze–thaw cycling exhibited a dual role: healing occurred at early stages (≤200 cycles), but 300 cycles led to irreversible strength loss. Microstructural analysis underscored the importance of hydration products (C–S–H, CaCO₃) in healing cracks, while F–T cycling disrupts interfacial bonding and accelerates matrix spalling. For UHPC structures in cold climates, proactive crack sealing and controlled curing are essential to maximize self-healing benefits before F–T damage accumulates. Future work should explore hybrid curing regimes and corrosion-resistant fibers to extend service life.

Keywords ultra-high performance concrete; self-healing; freeze–thaw cycles; tensile performance