

环境与弯拉荷载共同作用下高延性水泥基复合材料的自愈合性能

巩妮娜¹, 王哲媛², 胡少伟³, 范向前⁴, 李 双², 耿方方⁵, 章 鹏¹, 李乾坤²

(1. 南京工程学院土木工程与智慧管理研究所, 南京 211167; 2. 江苏海洋大学土木与港海工程学院, 江苏 连云港 222005; 3. 郑州大学黄河实验室, 郑州 450001; 4. 南京水利科学研究院, 南京 210024; 5. 南京工程学院建筑工程学院, 南京 211167)

摘 要: 高延性水泥基复合材料(ECC)具有高延性、高韧性等特点, 大量细密裂缝的产生为其自愈合提供条件, 海洋环境中硫酸盐含量较高、北方部分地区土壤呈碱性, 为了揭示环境与荷载共同作用下 ECC 的自愈合性能, 分别开展了 3 种环境 (5% Na_2SO_4 、饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、清水)下、不同预加载水平的拉伸试件(0%、1%、2%)及四点弯曲试件(0%、20%、40%)在不同龄期的性能试验研究。结果表明: ECC 自愈合后抗拉性能恢复良好, 预拉应变 1%有利于恢复试件各龄期的抗拉强度, 5% Na_2SO_4 及饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 干湿循环作用有利于提升 ECC 抗拉强度, 且 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 环境的恢复效果更好; 清水环境对于完好试件(预拉 0%)长龄期下的延性恢复效果明显, 5% Na_2SO_4 及饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 干湿循环作用削弱有裂缝试件的延性, 预拉应变 2%时极限拉应变降幅最大, 可达 52.78%~65.39%。预加载 40%对于四点弯曲薄板的初裂抗弯强度、极限抗弯强度恢复作用最显著, 且 5% Na_2SO_4 干湿循环作用的效果更佳, 预加载 20%明显提升极限挠度, 且清水环境最具优势; 抗弯延性与多缝开裂模式正相关; 5% Na_2SO_4 及饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 干湿循环作用对于试件短龄期的抗弯强度恢复作用明显, 对微裂缝愈合具有积极效果; 自愈合 90 d 后, 预加载 20%薄板的初始弯曲刚度比、残余弯曲刚度比恢复效果最佳, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 环境有利于提升峰前弯曲韧性, 清水环境有利于提升峰后弯曲韧性。

关键词: 高延性水泥基复合材料; 环境作用; 自愈合; 抗拉性能; 抗弯性能

中图分类号: TV331 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)11-3214-13

网络出版时间: 2024-11-01



混凝土因取材容易、可模性好、抗压强度高等优点而得以广泛应用, 但亦存在开裂后裂缝宽度难以控制、脆性特征明显等问题^[1-4]。为了弥补传统混凝土的不足, 学者们采用添加纤维的方式控制裂缝扩展, 但仍存在软化特征^[5-8]。20 世纪 90 年代初, Li 等^[9-10]研发的高延性水泥基复合材料(ECC)应运而生。由于纤维的存在, ECC 在受压、受拉和弯曲作用下表现出超高的韧性、能量耗散以及抑制开裂效应^[11-13], 被广泛应用于各类受损结构的修复和加固工程。

自愈合指在不借助任何外部作用的条件下材料对裂缝的修复能力^[14]。聚乙烯醇纤维(PVA 纤维)具有高弹性模量、高强度等特性, PVA-ECC 中纤维体积掺量 $\leq 2.0\%$ 时即可表现出高延性、高韧性^[15-16],

大量细密裂缝的产生, 使得材料具有明显的自愈合能力^[14, 17], 进而提升其安全性和耐久性。

学者们对 ECC 自愈合后的拉伸性能进行研究并取得成果。Yang 等^[18]开展了清水干湿循环条件下 ECC 自愈合性能研究, 发现承受高水平(2%或 3%)预加载的试件, 自愈合后极限抗拉强度仍有提升, 且拉伸应变保持在 1.8%~3.0%; 干湿循环过程中温度变化会导致抗拉强度增大、极限拉应变小幅降低。干湿循环初期自愈合速度最快; 早龄期 ECC 在低预加载水平(0.3%~0.5%)下刚度恢复效果更好; 不同预加载条件下, 自愈合 90 d 后试件表面平均裂缝宽度明显减小, 愈合效果显著^[19]。Liu 等^[20]将预加载 1%的拉伸试件置于硫酸盐-硫酸盐-氯盐复合溶液中进行愈合试验, 得出腐蚀环境对 ECC 的初裂抗拉强度、

收稿日期: 2024-09-02。 修订日期: 2024-10-15。

基金项目: 国家自然科学基金(52101313, 52171270, 51879168, 12202179);
国家自然科学基金委-河南省联合基金重点项目(U23A20672);
江苏省自然科学基金面上项目(BK20221400); 南京工程学院
科研启动基金(YKJ202322)。

第一作者: 巩妮娜(1981—), 女, 博士, 副教授。

通信作者: 巩妮娜(1981—), 女, 博士, 副教授。

Received date: 2024-09-02. Revised date: 2024-10-15.

First author: GONG Nina(1981—), female, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: gnn@njit.edu.cn

Correspondent author: GONG Nina(1981—), female, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: gnn@njit.edu.cn

极限抗拉强度、极限拉应变等均有提升作用,自愈合裂缝在不重新打开时即可传递拉伸荷载,有利于刚度恢复,相比于清水环境,ECC 在腐蚀环境中愈合得更快、更彻底,且硫酸盐环境效果更突出。阚黎黎等^[21]通过试验发现带裂缝试件(预加载 1%~2%)在硫酸盐-干湿循环作用下裂缝数量、宽度均明显减小,高预加载水平(2%)导致更多细密裂缝产生,自愈合后极限拉应变恢复更明显,且短龄期的愈合效果更好;干湿循环 30 d 后,带裂缝试件的抗拉强度提高 31%以上。Sahmaran 等^[22]指出预拉 1%、2%的 ECC 试件置于氢氧化钠环境中 90 d 后仍保持不小于 2%的拉伸应变及多缝开裂模式。Zhang 等^[23]通过试验得到,相比常温清水环境,饱和氢氧化钙溶液促使 ECC 试件拉伸刚度和抗压强度的恢复,加速其自愈合行为。此外,郭丽萍等^[24]研究了氯盐环境下 ECC 的弯曲自愈合性能,指出随着干湿循环次数的增加,不同预加载水平试件的弯曲韧性逐渐增大,低预加载水平下的恢复效果更好,8 次干湿循环后,预加载 20%试件的弯曲韧性即可能超出未预加载试件。

综上所述,ECC 自愈合后的拉伸性能已有一些研究,但弯曲性能的成果较少,且多集中在硫酸盐环境;饱和氢氧化钙溶液增强胶凝材料的火山灰反应,可能加速裂缝愈合,碱性环境中 ECC 的自愈合性能仍需进一步研究。中国北方部分地区土壤在碱性环境下 pH 值超过 9,海洋环境中硫酸盐含量一般可达 1400~2700 mg/L,且经常受到水位变动引起的干湿循环作用影响,而水是自愈合发生的必要条件。因此,为了更加全面系统地分析不同环境、不同预加载条件下 ECC 的自愈合性能,本工作开展 3 种环境下(5% Na_2SO_4 (质量分数)、饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、清水)ECC 自愈合后拉伸、弯曲性能的试验研究,以期 ECC 材料进一步的工程实践应用奠定基础。

1 实验

1.1 原材料及配合比

原材料: P·O 42.5 硅酸盐水泥,郑州蓝科环保净水材料厂生产; I 级粉煤灰; 石英砂, 80~120 目, 河南某石英砂厂生产; 聚羧酸高效减水剂, 启臣化工有限公司生产; 日本可乐丽牌聚乙烯醇纤维(PVA 纤维); 自来水。由于 PVA 纤维易结团,在浇筑前将纤维搓散备用。表 1 为粉煤灰化学成分表,表 2 为 PVA 纤维物理力学指标,经过试配选取 ECC 的配合比见表 3, PVA 纤维体积分数为 2%。

表 1 粉煤灰化学成分表

Table 1 Chemical composition of fly ash w/%				
Al_2O_3	CaO	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2
23.16	9.13	45	1.9	

Data is provided by the manufacturer. w is mass fraction.

表 2 PVA 纤维物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical properties of PVA fibers					
Density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Tensile strength/ MPa	Elastic modulus/ GPa	Diameter/ mm	Length/ mm	Elongation/ %
1.2	1600	42.8	0.031	12	6

表 3 ECC 材料配合比

Table 3 Mix proportion of ECC					$\varphi\left(\frac{\text{PVA}}{\text{fiber}}\right)/\%$
Mix proportion/(kg·m ⁻³)					
Cement	Fly ash	Water	Quartz sand	Superplasticizer	
547	821	479	493	2.05	2

φ is volume fraction.

1.2 试件制备

按以下步骤制备 ECC 试件: 1) 将水泥、粉煤灰、石英砂等按照配合比称重后搅拌 2 min, 使原材料充分拌合均匀; 2) 加入水与减水剂再进行搅拌, 观察浆体流动状态并加入纤维搅拌 3~5 min; 3) 将拌和物装入预先刷油的模具中成型, 振捣密实后在模具表面覆盖一层保鲜膜防止水分蒸发; 4) 空气养护 24 h 后脱模, 置于标准养护室(21 °C 蒸汽养护, 湿度 95%)养护 28 d。选取 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试块测试抗压强度, 7 d 平均抗压强度为 13.57 MPa, 28 d 平均抗压强度为 20.78 MPa。

为避免加载时因应力集中致使夹持部位破坏,拉伸试件采用狗骨形^[25], 形状及尺寸见图 1。四点弯曲试件采用薄板型^[26], 尺寸为 15 mm × 100 mm × 400 mm, 见图 2。每组浇筑 3 根试件求取平均值。

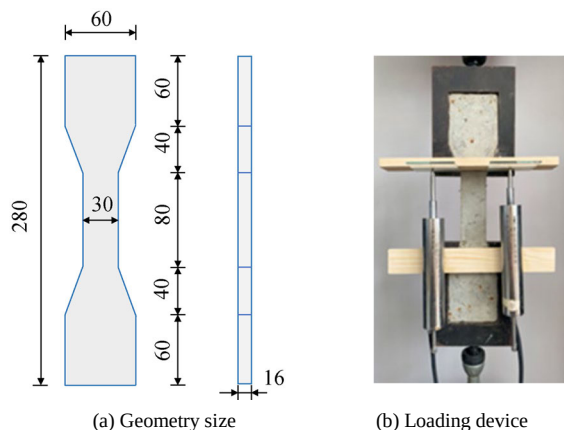


图 1 单轴拉伸试件
Fig. 1 Uniaxial tensile specimen

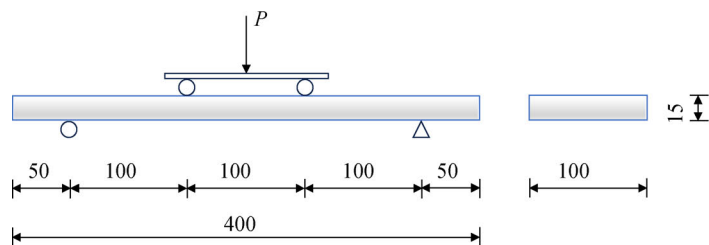
1.3 自愈合试验

1.3.1 干湿循环试验 为了分析不同环境对 ECC 抗拉及抗弯自愈合性能的影响, 参考文献[21, 23, 27] 设计了 3 种环境: 1) 5%(质量分数) Na_2SO_4 -干湿循环; 2) 饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -干湿循环; 3) 清水环境(作为对照组)。将预加载后的试件分别置于其中, 干湿循环方式如下: 5 d 浸泡于溶液, 5 d 置于室温环境, 10 d 为 1 个循环, 置于清水环境的对照组试件采用持续浸泡方式[20, 23, 28], 龄期分别为 0、30、90 d。

1.3.2 单轴拉伸试验 制备 3 种环境下狗骨形试件共 9 批, 见表 4。分析相关文献, 预拉应变 2% 干湿循环 30 次后, 试件裂缝数量明显减少, 最大裂缝宽度也由自愈合前的 $100\ \mu\text{m}$ 降至 $50\ \mu\text{m}$, 有利于阻碍外部侵蚀离子的入侵, 提高耐久性, 且此时极限

拉应变仍接近 2%^[21], 而当预拉应变从 2% 增至 3% 后, 极限拉应变和最终应力趋于稳定^[29], 因此本工作采用预拉应变 1% 和 2% 作为预加载水平, 到达设定值后停止并卸载, 预加载组与预拉应变 0% 的完好试件均置于自愈合环境, 至相应龄期后进行拉伸试验。采用万能试验机开展单轴拉伸试验, 测量标距位于中部均匀段, 位移加载控制, 速率 $0.3\ \text{mm/min}$, 安装位移计记录加载过程的位移变化, 试验数据通过东华数据采集器采集。加载装置见图 1b。

1.3.3 四点弯曲试验 制备 3 种环境下四点弯曲薄板共 9 批, 见表 5。参考文献[24, 30–31]并基于预试验结果, 为了避免预加载所产生的裂缝宽度过大难以愈合, 本工作对完好试件加载得到荷载–挠度曲线并获取极限强度, 选取其 20% 和 40% 作为预加载



(a) Geometry size



(b) Loading device

图 2 四点弯曲试件

Fig. 2 Four-point bending specimen

表 4 单轴拉伸试件编号规则

Table 4 Numbering rules for uniaxial tensile specimen

Environment	Pre-loading level	Age/d		
		0	30	90
Water (Control group)	0%	E0-0-W-T	E30-0-W-T	E90-0-W-T
	1%	E0-1-W-T	E30-1-W-T	E90-1-W-T
	2%	E0-2-W-T	E30-2-W-T	E90-2-W-T
Dry-wet cycle in 5% Na_2SO_4 (in mass)	0%	E0-0-S-T	E30-0-S-T	E90-0-S-T
	1%	E0-1-S-T	E30-1-S-T	E90-1-S-T
	2%	E0-2-S-T	E30-2-S-T	E90-2-S-T
Dry-wet cycle in saturated $\text{Ca}(\text{OH})_2$	0%	E0-0-Ca-T	E30-0-Ca-T	E90-0-Ca-T
	1%	E0-1-Ca-T	E30-1-Ca-T	E90-1-Ca-T
	2%	E0-2-Ca-T	E30-2-Ca-T	E90-2-Ca-T

表 5 四点弯曲试件编号规则

Table 5 Numbering rules for four-point bending specimen

Environment	Pre-loading level	Age/d		
		0	30	90
Water (Control group)	0%	E0-0-W-F	E30-0-W-F	E90-0-W-F
	20%	E0-20-W-F	E30-20-W-F	E90-20-W-F
	40%	E0-40-W-F	E30-40-W-F	E90-40-W-F
Dry-wet cycle in 5% Na_2SO_4	0%	E0-0-S-F	E30-0-S-F	E90-0-S-F
	20%	E0-20-S-F	E30-20-S-F	E90-20-S-F
	40%	E0-40-S-F	E30-40-S-F	E90-40-S-F
Dry-wet cycle in saturated $\text{Ca}(\text{OH})_2$	0%	E0-0-Ca-F	E30-0-Ca-F	E90-0-Ca-F
	20%	E0-20-Ca-F	E30-20-Ca-F	E90-20-Ca-F
	40%	E0-40-Ca-F	E30-40-Ca-F	E90-40-Ca-F

水平开展弯曲试验, 并以预加载 0% 的试件作为完好组, 与拉伸试验方式类似。采用长春新试验仪器有限公司制造的 WDW3300 微控电子万能试验机开展试验, 位移加载控制, 速率 0.3 mm/min。加载装置见图 2b。

2 结果和讨论

2.1 自愈合后的拉伸性能

2.1.1 应力-应变曲线 图 3 为试件 E90-1-W-T 的应力-应变曲线及表面裂缝, 为了清晰显示, 图 3b 以白色线条标识微裂缝。应力应变曲线可分为 3 个阶段: 阶段 I: O~A 弹性阶段, 应力随应变呈正比例上升趋势, 试件中部观测区域未发现裂缝; 阶段 II: A~B 应变硬化与多缝开裂阶段, 随着应力小幅下降试件表面出现第 1 条裂缝, 由于 PVA 纤维-基体的粘结作用裂缝并未进一步扩展, 周围陆续出现多条微小裂缝, 反应在曲线上即为应力的多次小

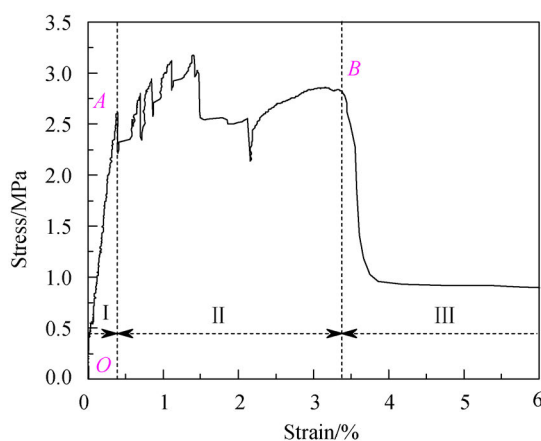
幅波动, 并伴随应变逐渐增加, 裂缝稳定扩展; 阶段 III: B 点之后的应变软化阶段, 应变逐渐增大而应力明显减小, 主裂缝处出现应力集中并扩展, 直至试件破坏。由于 B 点后应力快速下降, 参照文献 [32] 的做法, 选取 B 点对应的应变为极限拉应变。

试件表现出的明显的应变硬化特征主要得益于材料中的 PVA 纤维。试件开裂后, 裂缝附近纤维的桥接作用约束其进一步发展, 并在周围产生新的微裂缝, 此外, 球状粉煤灰颗粒的存在使得材料内部结构更加均匀, 减少内部缺陷, 促进了 PVA 纤维与基体间的应力传递, 均有利于多缝开裂现象的发生。

2.1.2 抗拉强度恢复 图 4 为 3 种环境中不同预拉水平试件的极限抗拉强度 f_{tu} 及抗拉强度恢复率 R_f , 按式(1)计算^[21, 25]。

$$R_f = (f_{tu} / f_{tu,s}) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $f_{tu,s}$ 为预拉 0% 试件未浸泡时的极限抗拉强度 (MPa)。



(a) Stress-strain curve



(b) Dog-bone specimen

图 3 应力-应变曲线及试件表面裂缝

Fig. 3 Stress-strain curve and surface cracks of dog-bone specimen

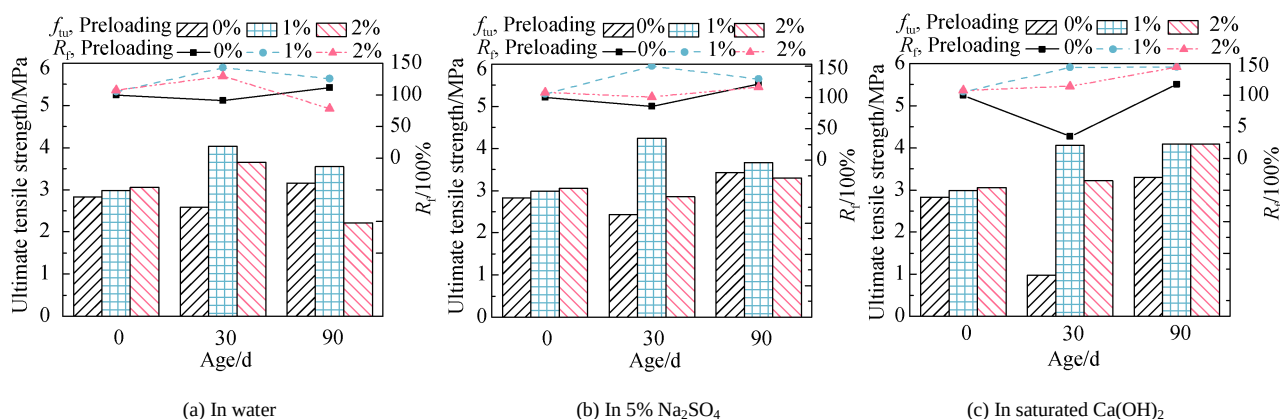


图 4 不同预拉水平下 ECC 极限抗拉强度

Fig. 4 Ultimate tensile strength of ECC under different preloading levels

分析可知,在龄期 0 d 即未浸泡条件下,随着预拉水平从 0%增至 2%,抗拉强度增长约 7.77%。清水环境中,3 种预拉水平下 90 d 的强度恢复率 R_f 分别为 111.77%、125.30%、78.37%,即预拉 0%及 1%时抗拉强度均有提升。随着龄期从 0 d 增至 90 d,完好试件(预拉 0%)的极限抗拉强度呈先减后增趋势,预拉应变 1%、2%试件(有裂缝试件)的极限抗拉强度则呈先增后减趋势,其中,预拉 1%试件 30 d 极限抗拉强度达到最大值 4.034 MPa,比 0 d 增长 35.37%(见图 4a)。养护初期,预加载产生的裂缝为水分传输提供通道,未完全水化的水泥颗粒与水发生反应生成 CaCO_3 晶体和 C-S-H(水化硅酸钙)凝胶等产物,同时粉煤灰与氢氧化钙发生二次水化反应,二者共同填充材料内部孔隙,部分粉煤灰颗粒填充于自愈合后的 PVA 纤维与基体之间,提升其桥接作用,拉伸强度得以恢复,随着养护龄期的增长,水化反应变缓甚至结束,自愈合动力下降,强度亦可能随之减小。

经 5% Na_2SO_4 和饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液干湿循环作用的试件,3 种预拉水平下 90 d 的强度恢复率 R_f 分别为 121.23%、129.61%、116.68%(Na_2SO_4 环境); 116.75%、144.45%、144.70%($\text{Ca}(\text{OH})_2$ 环境)。当龄期从 0 d 增至 90 d,预拉应变 1%试件的极限抗拉强度基本呈先增后减趋势,与清水环境类似,且 Na_2SO_4 环境中试件 30 d 的抗拉强度取最大值 4.248 MPa,略大于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 环境中 30 d 的 4.056 MPa(见图 4b~图 4c); 90 d 时预拉应变 1%、2%试件的极限抗拉强度基本稳定,约为 3.48 MPa (Na_2SO_4)、4.09 MPa ($\text{Ca}(\text{OH})_2$),比 0 d 增长约 16%、36.33%。分析原因,2 种环境下自愈合产物一方面填充材料内部孔隙,另一方面与 PVA 纤维黏结,增强纤维的桥接作用,

进而提升抗拉强度,表现出较强的自愈合性能。以 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 环境为例,水中的二氧化碳与氢氧化钙发生反应生成 CaCO_3 晶体,而该环境加速了这一反应的进行,使得裂缝处产生大量的晶体与凝胶, PVA 纤维与基体间的界面性能得以改善,裂缝间孔隙被晶状物质等填充得更加完整。总体而言,3 种环境中预拉应变 1%试件在各龄期抗拉强度均具明显优势, Na_2SO_4 及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 干湿循环作用对 3 种预拉水平下 ECC 抗拉性能的恢复均有效果,预拉应变 2%时效果明显优于清水环境,且 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 环境恢复能力更优。

2.1.3 极限拉应变恢复 图 5 为 3 种环境不同预拉水平下试件的极限拉应变。在 0 d 即未浸泡条件下,随着预拉水平从 0%增至 2%,极限拉应变从 1.258%增至 2.988%,增幅约 138.4%,说明预拉后重加载明显提升试件延性,效果优于对抗拉强度的提升。总体来讲, Na_2SO_4 及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 环境下试件短龄期(30 d)的极限拉应变明显大于长龄期(90 d)的取值。预拉 0%时,随着龄期从 0 d 增至 90 d,清水环境中试件的极限拉应变总体呈增长趋势,增幅为 137.52%; 30 d 后速度趋缓,其余 2 种环境中该值呈先增后减趋势,总体增幅约 42.61%,即清水浸泡对于长龄期试件延性恢复效果最明显。随着龄期从 0 d 增至 90 d,2 种干湿循环作用下预拉应变 1%、2%试件的极限拉应变总体呈下降趋势,降幅分别为 36.56%(1%、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$)、65.39%(2%、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$)、18.69%(1%、 Na_2SO_4)、52.78%(2%、 Na_2SO_4)。如前所述,材料中二次水化产物填充试件内部孔隙增加密实度,抗拉强度有所提升(见图 4),但亦显著削弱延性,且 Na_2SO_4 环境对于试件延性保持效果更好。

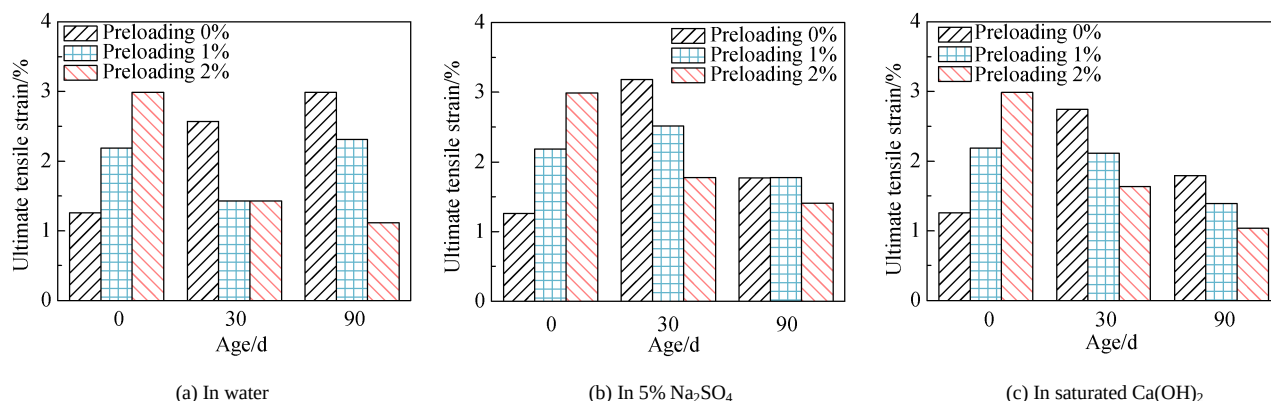


图 5 不同预拉水平下 ECC 极限拉应变

Fig. 5 Ultimate tensile strain of ECC under different preloading levels

以 3 种环境中 90 d 龄期结果分析, 随着预拉水平从 0% 增至 2%, 极限拉应变均呈下降趋势, 降幅分别为 61.95% (清水)、20.46% (Na_2SO_4)、42.36% ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)。图 6 为清水环境中不同预拉水平试件 90 d 的应力-应变曲线及表面裂缝。预拉应变 2% 时极限拉应变最小, 延性最差, 多缝开裂模式亦不明显, 分析原因, 该水平下产生的微裂缝宽度较大导致愈合难度增加, 易于产生单一裂缝破坏, 图 6 虚线圈内即为主裂缝。综上可知, ECC 试件自愈合后, 预拉水平增大导致拉伸延性降低, 且清水环境的降幅最大, Na_2SO_4 环境更有利于延性保持。

2.2 自愈合后的弯曲性能

ECC 四点弯曲薄板加载后通常在下表面出现多条细密裂缝, PVA 纤维的桥接作用使试件具有较大跨中挠度, 开展自愈合后弯曲性能的分析有其必要性。

2.2.1 荷载-挠度曲线 以试件 E30-0-Ca-F 为例,

图 7 为荷载-跨中挠度 ($P-\delta$) 曲线及试件表面裂缝。加载过程亦可分为 3 个阶段: 阶段 I, C~D 弹性上升阶段, 荷载随挠度基本呈线性上升, 薄板略有小幅弯曲, D 点对应的荷载即为初裂荷载; 阶段 II, D~E 多缝开裂阶段, 试验力小幅下降后又上升, 如此多次循环波动, 跨中位移亦逐渐增加, 观察到薄板底部受拉区域出现多条细密裂缝 (见图 7b), 试件弯曲程度加剧, 由于基体与 PVA 纤维间的粘结作用, 微裂缝产生后试件并未直接断裂; 阶段 III, E~F 软化阶段, 试件底部主裂缝宽度迅速增大发生失稳扩展, 荷载逐渐减小直至试件破坏。

2.2.2 抗弯强度恢复 试件的初裂抗弯强度、极限抗弯强度分别根据式(2)、式(3)计算^[26]。

$$\sigma_c = \frac{P_{wc}L}{bh^2} \quad (2)$$

$$\sigma_u = \frac{P_{wu}L}{bh^2} \quad (3)$$

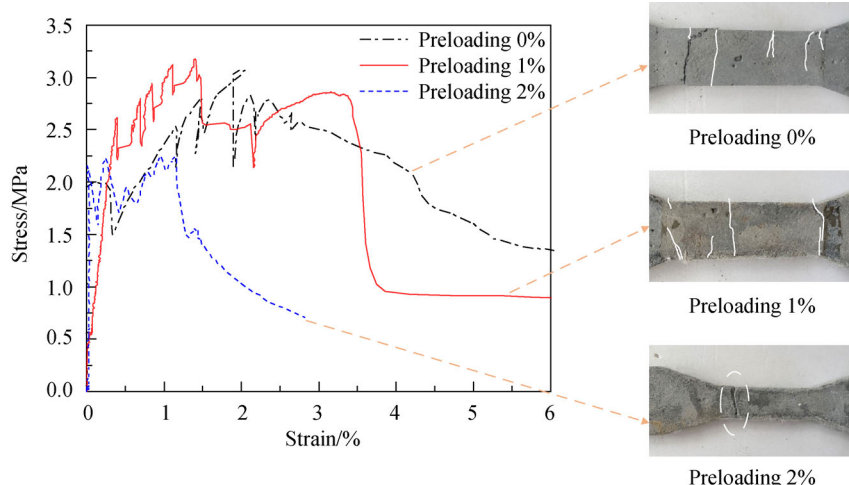
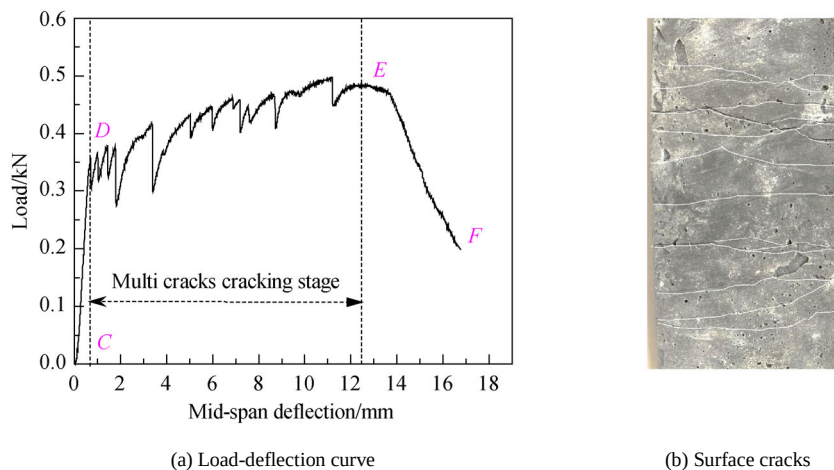


图 6 清水环境中中龄期 90 d 不同预拉水平试件应力-应变曲线及表面裂缝

Fig. 6 Stress-strain curves and surface cracks of specimens with different preloading levels after self-healing for 90 d in water



(a) Load-deflection curve

(b) Surface cracks

图 7 四点弯曲薄板

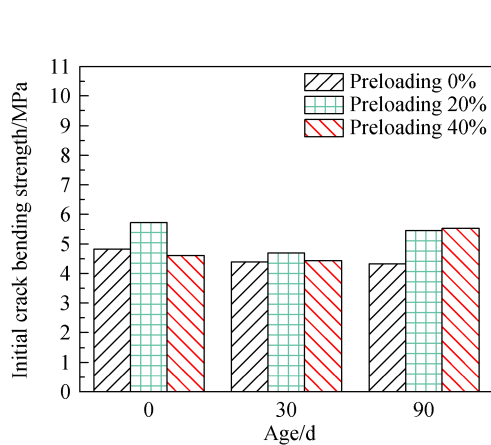
Fig. 7 Four-point bending thin plate

式中： σ_c 、 σ_u 分别为初裂抗弯强度、极限抗弯强度 (MPa)； P_{wc} 、 P_{wu} 分别为初裂荷载、极限荷载 (N)； L 为支座间跨度 (mm)； h 、 b 分别为薄板截面厚度、宽度 (mm)。

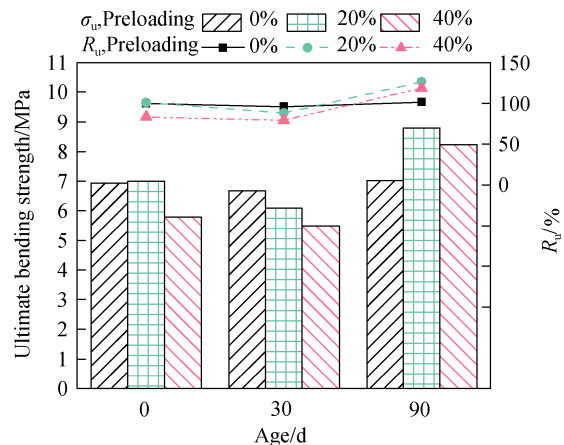
抗弯强度恢复率 R_u 按式(4)计算。

$$R_u = (\sigma_u / \sigma_{u,s}) \times 100\% \quad (4)$$

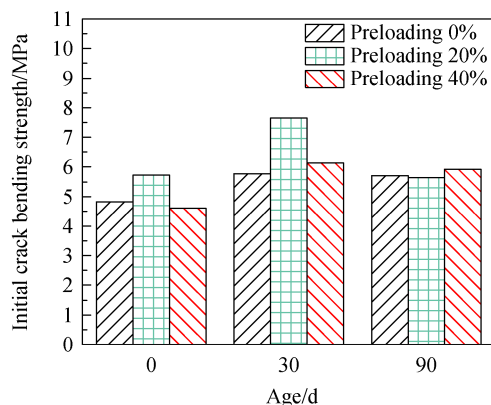
式中： $\sigma_{u,s}$ 为预加载 0% 试件未浸泡时的极限抗弯强度 (MPa)。



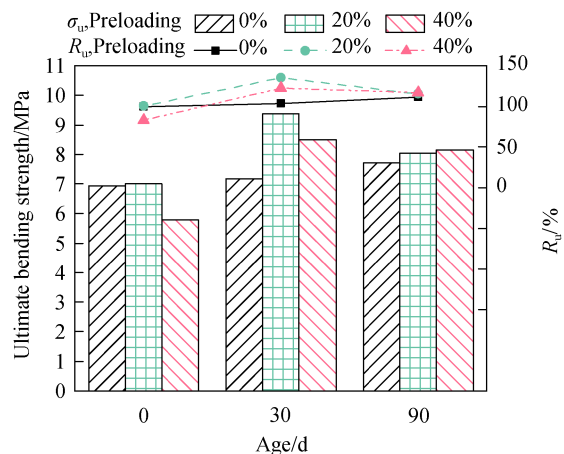
(a) Initial crack flexural strength (in water)



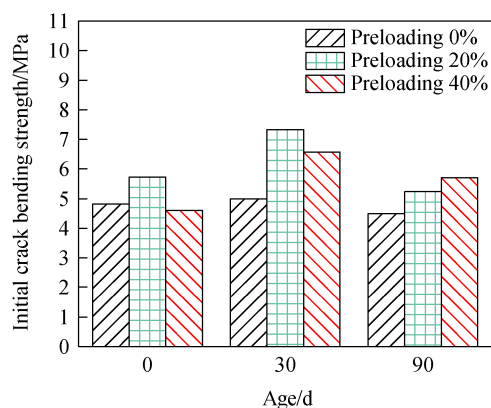
(b) Ultimate flexural strength (in water)



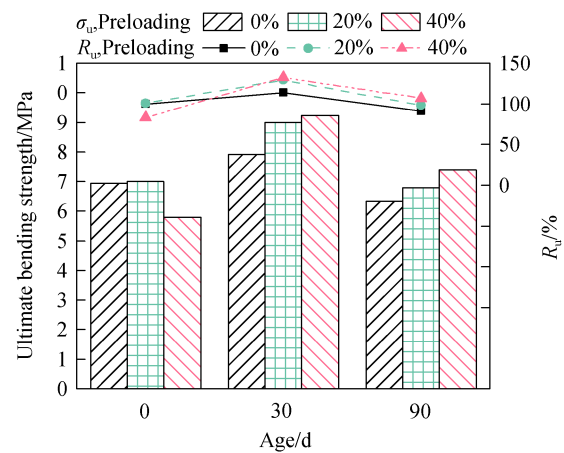
(c) Initial crack flexural strength (in 5% Na₂SO₄)



(d) Ultimate flexural strength (in 5% Na₂SO₄)



(e) Initial crack flexural strength (in saturated Ca(OH)₂)



(f) Ultimate flexural strength (in saturated Ca(OH)₂)

图 8 不同预加载条件下 ECC 抗弯强度

Fig. 8 Flexural strength of ECC under different preloading levels

图 8 为 3 种环境不同预加载条件下试件的初裂抗弯强度、极限抗弯强度、抗弯强度恢复率。在 0 d 时, 预加载 20%再重新加载, 初裂抗弯强度和极限抗弯强度均取得最大值, 分别为 5.73 MPa、7.00 MPa。清水环境中, 3 种预加载水平下极限抗弯强度基本呈先减后增趋势, 90 d 的强度恢复率 R_u 分别为 101.15%、126.80%、118.73%, 即有预裂缝试件的极限抗弯强度均得以较大恢复, 其中, 预加载 20%试件 90 d 时达到最大值 8.80 MPa, 相比预加载 0%、40%增幅分别为 25.36%、6.80%。

Na_2SO_4 及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 环境中 3 种预加载水平下 90 d 的 R_u 分别为 111.24%、115.71%、117.29% (Na_2SO_4), 91.35%、97.84%、106.48% ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), Na_2SO_4 环境对于极限抗弯强度的恢复效果更佳。总体而言, 这 2 种环境下试件 30 d 的初裂、极限抗弯强度远大于清水环境的取值, 以 Na_2SO_4 环境预加载 20%龄期 30 d 为例, 相比同条件清水环境增幅分别为 62.90%、54.02% (初裂、极限抗弯强度), 90 d 则差别不大, 说明其对于试件短龄期的抗弯强度恢复作用明显, 且预加载 20%的优势更突出。预加载 40%条件下, 随着龄期从 0 d 增至 90 d, 3 种环境中试件的初裂、极限抗弯强度总体呈上升趋势。其中, 初裂抗弯强度增幅分别为 20.22% (清水)、28.91% (Na_2SO_4)、24.13% ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), 极限抗弯强度增幅分别为 42.07% (清水)、40.35% (Na_2SO_4)、27.42% ($\text{Ca}(\text{OH})_2$); 而预加载 0%、20%的试件, 增幅明显低于上述取值, 部分随龄期增长逐渐下降, 说明预加载 40%对于试件长龄期抗弯强度的恢复作用最明显, Na_2SO_4 环境效果更佳。

已有研究表明, 自愈合效果主要通过水泥颗粒继续水化、粉煤灰的火山灰反应以及 CaCO_3 结晶沉

淀实现^[24]。以 Na_2SO_4 -干湿循环环境为例, 水化初期逐渐产生了 CaCO_3 及石膏晶体, 同时硫酸根离子与水泥中的氢氧化钙、铝酸钙发生反应生成六角柱状的钙矾石晶体^[33], 裂缝表面产生较为致密的层状晶体结构, Na_2SO_4 并未传输至材料内部, 且 ECC 中的粉煤灰在二次水化中消耗了大量易受硫酸盐侵蚀的氢氧化钙组分, 抗硫酸盐侵蚀能力得以提升, 因此抗拉强度、抗弯强度等均呈增长趋势; 随着侵蚀的进行, 结晶压力增大超出材料内部粘结力时, 可能导致裂缝生成及不断扩展, 进而出现强度下降。

2.2.3 极限挠度恢复 计极限抗弯强度对应的跨中挠度为极限挠度, 图 9 为不同预加载条件下 ECC 极限挠度变化趋势。在 0 d 时, 随着预加载水平的提高跨中挠度明显减小, 相对于预加载 0%, 预加载 20%、40%时该值降幅分别为 50.85%、23.13%, 即未浸泡时预加载会明显削弱试件抗弯延性。3 种环境中预加载 20%条件下, 随着龄期从 0 d 增至 90 d, 挠度基本线性增长, 增幅分别为 137.25% (Na_2SO_4)、105.06% ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)、202.83% (清水), 而预加载 0%、40%条件下, 仅清水环境中增幅近 26.2%, 其余 2 种环境中均呈下降趋势。说明预加载 20%对挠度恢复效果显著, 且清水环境的效果最好, 一定程度上也得益于抗弯强度的提升 (见图 8), Na_2SO_4 及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 环境则易于削弱试件的抗弯延性, 与抗拉性能结论类似。以预加载 20%、龄期 90 d 试件的极限挠度计, 清水、 Na_2SO_4 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 环境中取值分别为 14.96、11.72、10.13 mm。分析原因, 2 种干湿循环作用下, 材料内部的水化产物填补孔隙, 试件密实度和整体刚度增大^[34], 对微裂缝愈合具有积极效果, 且 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的愈合能力略强。

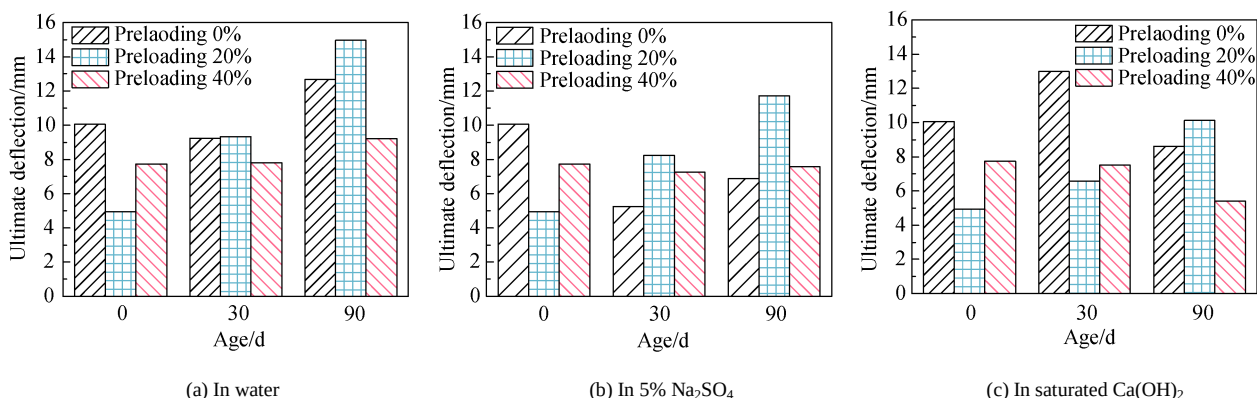


图 9 不同预加载条件下 ECC 试件极限挠度

Fig. 9 Ultimate deflection of ECC under different preloading levels

为了更清晰地分析预加载 20% 条件下试件延性恢复情况, 图 10 以清水环境中不同龄期薄板 $P-\delta$ 曲线及表面裂缝为例进行说明。随着龄期从 0 d 增至 90 d, ECC 薄板挠度显著增大, 相应的, 表面裂缝数量增多且间距减小, 多缝开裂模式更加明显。分析原因, 随着水化的持续进行生成结构密实的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶、针棒状的钙矾石及 CaCO_3 晶体, 其互相搭接形成稳定的空间结构, 并出现团聚现象, 内部结构不断密实并细化; 自愈合产物在裂纹表面形成, 逐渐向中部生长, PVA 纤维发生滑移拔出, 其表面附着大量小粒径的胶凝材料, 部分纤维留存于基体内部, 其桥联作用为自愈合产物提供了成核点, 使得基体出现更大范围的多缝开裂现象, 极限挠度增加, 进一步说明预加载 20% 条件下溶液浸泡可明显增大薄板的延性, 抗弯延性与多缝开裂模式呈正相关。

2.2.4 弯曲韧性恢复 弯曲韧性用以表征材料在承载过程中吸收能量的水平。ECC 材料具有多缝开裂特性, 且在不同加载阶段韧性特征有所不同, 因此计算初始弯曲韧度比($R_{e,c}$)、残余弯曲韧度比($R_{e,k}$)分别评价 ECC 薄板的峰前弯曲韧性和峰后弯曲韧性^[35–36], 见式(5)~式(6)。

初始弯曲韧度比,

$$R_{e,c} = \frac{3T_p L}{2bh^2 \delta_p \sigma_u} \quad (5)$$

残余弯曲韧度比,

$$R_{e,k} = \frac{3T_{p,k} L}{2bh^2 (\delta_k - \delta_p) \sigma_u} \quad (6)$$

式中: T_p 为 $P-\delta$ 曲线中峰值挠度前的面积($\text{N}\cdot\text{mm}$); $T_{p,k}$ 为 $P-\delta$ 曲线中 δ_p 与 δ_k 之间的面积($\text{N}\cdot\text{mm}$); δ_p 为峰值挠度(mm); δ_k 取峰后 40% 最大荷载对应的挠度(mm); σ_u 为极限抗弯强度(MPa); L 为试件跨度(mm); h 、 b 分别为薄板截面厚度、宽度(mm)。

不同预加载条件下 ECC 薄板的初始弯曲韧度比与残余弯曲韧度比见图 11。3 种环境中预加载 20% 试件的残余弯曲韧度比均随龄期的增加而增大, 增幅分别为 20.55%(清水)、12.82%(Na_2SO_4)、10.83%($\text{Ca}(\text{OH})_2$), 最大值出现在清水环境 90 d, 为 1.275(见图 11b)。预加载 20% 试件的初始弯曲韧度比随龄期亦大致呈上升趋势, 增幅分别为 11.59%(清水)、13.37%(Na_2SO_4)、17.11%($\text{Ca}(\text{OH})_2$), 最大值出现在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 环境 90 d, 为 1.251。完好试件(预加载 0%)的残余弯曲韧度比呈先增后减趋势, 在 30 d 达到最大, 基本取 1.17 左右; 预加载 40% 时残余韧度比呈增长趋势, 增幅分别为 10.15%(清水)、5.22%(Na_2SO_4)、8.32%($\text{Ca}(\text{OH})_2$)。总体而言, 预加载 20% 条件下, 初始韧度比、残余韧度比的恢复效果最好, 清水环境有利于提升峰后弯曲韧性, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 环境有利于提升峰前弯曲韧性。

从不同预加载水平下薄板的极限抗弯强度、极限挠度、弯曲韧度比结果可知, 饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 相对于清水环境取值较低。分析原因, ECC 中的粉煤灰与氢氧化钙发生火山灰反应, 而饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液加速了这一反应, 可能不利于弯曲加载过程中裂缝表面晶体的生成, 膨胀量变小, 表现为填充裂缝的产物较为松散, 愈合效果略差^[37]。

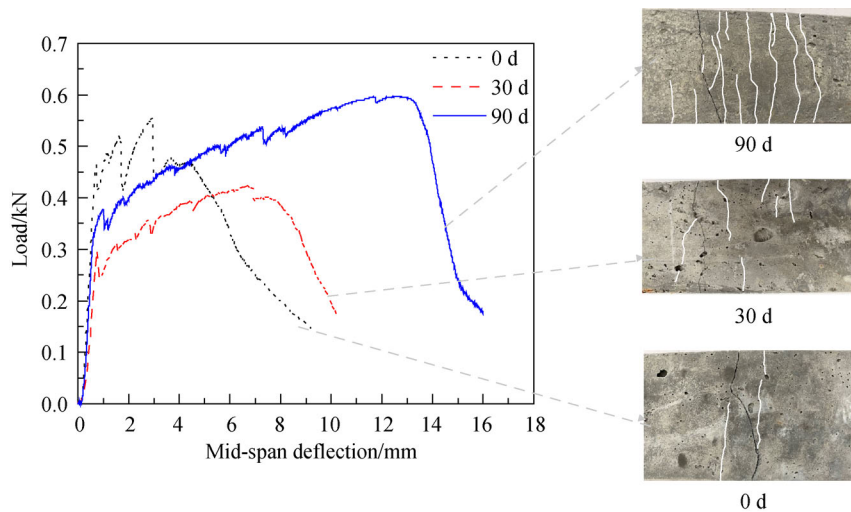


图 10 清水环境中预加载 20% 不同龄期薄板荷载-跨中挠度曲线及表面裂缝分布

Fig. 10 Load-midspan deflection curves and surface crack of thin plates under preloading of 20% at different ages in water

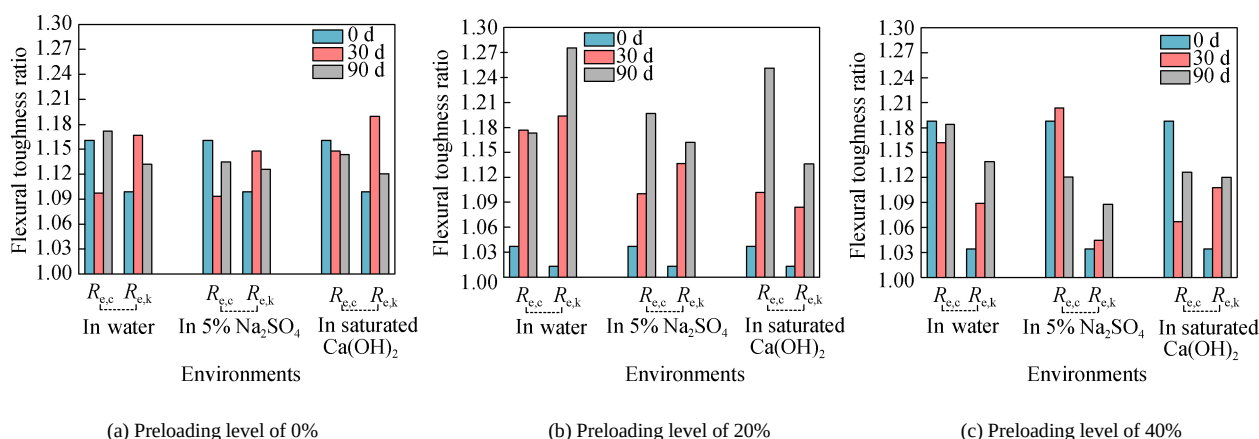
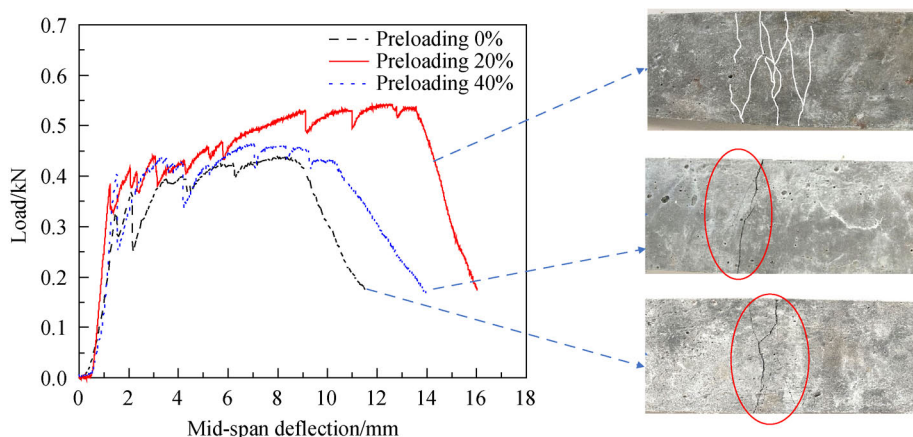


图 11 不同环境 ECC 薄板弯曲韧度比

Fig. 11 Bending toughness ratio of ECC thin plates in different environments

图 12 为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 环境 90 d 时不同预加载水平下 ECC 薄板的荷载-挠度曲线及表面裂缝, 预加载 20% 时曲线下包围的面积最大, 虽然极限抗弯强度及相应跨中位移亦较大, 但按式(5)计算后初始弯曲韧度比仍

有明显优势。图 12 中以白色线条表示细密裂缝, 其他 2 根试件的裂缝基本集中于红色线圈内, 明显可见预加载 20% 时试件表面裂缝数量多且密集, 多缝开裂模式最明显, 即抗弯延性与多缝开裂模式正相关。

图 12 饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -干湿循环 90 d 不同预加载水平试件的荷载-跨中挠度曲线及表面裂缝图Fig. 12 Load-midspan deflection curves and surface cracks of specimens with different preloading levels under dry-wet cycles in saturated $\text{Ca}(\text{OH})_2$ for 90 d

3 结论

1) ECC 自愈合后拉伸性能恢复良好。应力应变曲线可分为 3 个阶段: 线弹性、应变硬化、应变软化阶段。预拉 1% 对于 3 种环境中试件各龄期的抗拉强度恢复优势明显, Na_2SO_4 及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 干湿循环作用有利于提升 ECC 抗拉强度, 且 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 环境的恢复能力更优, 预拉 1% 条件下龄期从 0 d 增至 90 d, 抗拉强度增幅约为 36.33%。

2) 预拉后重加载对于试件 0 d 的拉伸延性具有明显提升作用, 随着预拉水平从 0% 增至 2%, 极限拉应变增幅可达 138.4%。清水环境对于完好试件(预拉 0%)长龄期下的延性愈合效果明显, 极限拉应变

增幅为 137.52%, Na_2SO_4 及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 干湿循环作用削弱有裂缝 ECC 试件的延性, 预拉 2% 时降幅最大, 可达 52.78%~65.39%, Na_2SO_4 环境对试件的延性保持效果较好。自愈合 90 d 时, 预拉水平增大会削弱试件拉伸延性, 清水环境降幅最大。

3) 未浸泡条件下, 预加载 20% 提升弯曲薄板的抗弯强度, 但削弱抗弯延性。随着自愈合龄期的增长, 预加载 40% 对于试件初裂抗弯强度、极限抗弯强度的恢复作用最显著, Na_2SO_4 环境的效果更佳, 相比 0 d 增幅分别达 28.91%、40.35%。预加载 20% 明显提升极限挠度, 且清水环境效果最好, 相比 0 d 增幅可达 202.83%。抗弯延性与多缝开裂模式正相关。 Na_2SO_4 及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 环境对于试件短龄期的抗弯

强度恢复作用明显,对微裂缝愈合具有积极效果。

4) 自愈合 90 d 后,预加载 20%薄板的初始弯曲刚度比、残余弯曲刚度比恢复效果最佳。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 环境有利于提升峰前的弯曲韧性,清水环境有利于提升峰后的弯曲韧性。

参考文献:

- [1] ZHU X Y, CHEN X D, BAI Y, et al. Evaluation of fracture behavior of high-strength hydraulic concrete damaged by freeze-thaw cycle test[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 321: 126346.
- [2] CHEN X D, SHI D D. Influence of freeze-thaw cycles on apparent dynamic tensile strength, apparent dynamic fracture toughness and microstructure of concrete under impact loading[J]. *Eur J Environ Civ Eng*, 2021, 25(11): 1977–2001.
- [3] 江文浩, 陆俊, 明攀, 等. 基于侧扫声呐的水下混凝土结构缺陷探查与量化分析[J]. *水电能源科学*, 2023, 41(8): 161–165.
Jiang W H, Lu J, Ming P, et al. *Water Resour Power*, 2023, 41(8): 161–165.
- [4] 张雷, 王志华, 佟继有, 等. 养护环境对混凝土限制收缩开裂影响研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(3): 156–162.
ZHANG Lei, WANG Zhihua, TONG Jiyu, et al. *J Water Resour Water Eng*, 2022, 33(3): 156–162.
- [5] 管俊峰, 鲁猛, 王昊, 等. 同时确定钢纤维高强混凝土的断裂韧度及拉伸强度[J]. *工程力学*, 2023, 40(3): 65–77.
Guan J F, Lu M, Wang H, et al. Simultaneously Determining Fracture Toughness and Tensile Strength of Steel Fiber High-Strength concrete[J]. *Eng Methanics*, 2023, 40(3): 65–77.
- [6] QING L B, ZHANG H, NIU C, et al. Preparation and fracture behavior of annularly aligned steel fiber reinforced cementitious composite: Experiment and simulation[J]. *J Build Eng*, 2023, 67: 106019.
- [7] YAO X H, LU M, GUAN J F, et al. Development of a design method for the fracture performance of steel fiber-reinforced concrete by considering steel fiber characteristics and aggregate gradation[J]. *Theor Appl Fract Mech*, 2022, 121: 103486.
- [8] 赵亮平, 汤寄予, 陈刚, 等. 高温中纤维纳米混凝土劈拉性能试验研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(5): 94–100.
ZHAO Liangping, TANG Jiyu, CHEN Gang, et al. *J N China Univ Water Resour Electr Power Nat Sci Ed*, 2023, 44(5): 94–100.
- [9] LI V C. On engineered cementitious composites (ECC)[J]. *J Adv Concr Technol*, 2003, 1(3): 215–230.
- [10] 孔燕, 邵永健, 杜亮, 等. ECC 的材料组成与性能关系分析[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(1): 68–74.
KONG Yan, SHAO Yongjian, DU Liang, et al. *Bull Chin Ceram Soc*, 2020, 39(1): 68–74.
- [11] KHAN S W, KAMAL M, KHAN F A, et al. Performance evaluation of the fresh and hardened properties of different PVA-ECC mixes: An experimental approach[J]. *Case Stud Constr Mater*, 2023, 18: e01764.
- [12] GAO S L, QI L, ZHU Y P, et al. Effect of Notch depth ratio on mode I and mixed mode I-II fracture properties of engineered cementitious composites (ECC)[J]. *Int J Solids Struct*, 2022, 236–237: 111363.
- [13] KAMAL M, KHAN S W, SHAHZADA K, et al. Experimental investigation of the mechanical properties of Engineered Cementitious Composites (ECC)[J]. *Inter J Geotech Eng*, 2016, 5: 40–45.
- [14] Li M, Li V C. Cracking and healing of engineered cementitious composites under chloride environment[J]. *ACI Mater J*, 2011, 108(3): 333.
- [15] ZHANG P, YUAN P, GUAN J F, et al. Fracture behavior of multi-scale nano-SiO₂ and polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composites under the complex environments[J]. *Theor Appl Fract Mech*, 2022, 122: 103584.
- [16] WANG C, ZHANG P, GUO J J, et al. Durability and microstructure of cementitious composites under the complex environment: Synergistic effects of nano-SiO₂ and polyvinyl alcohol fiber[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 400: 132621.
- [17] KAN L L, SHI H S. Investigation of self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC) materials[J]. *Constr Build Mater*, 2012, 29: 348–356.
- [18] YANG Y Z, LEPECH M D, YANG E H, et al. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles[J]. *Cem Concr Res*, 2009, 39(5): 382–390.
- [19] YANG Y Z, YANG E H, LI V C. Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age[J]. *Cem Concr Res*, 2011, 41(2): 176–183.
- [20] LIU H Z, ZHANG Q, GU C S, et al. Self-healing of microcracks in Engineered Cementitious Composites under sulfate and chloride environment[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 153: 948–956.
- [21] 阚黎黎, 龚雅文, 王靖荣. 硫酸盐-干湿循环下高延性纤维增强水泥基材料的自愈合[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(2): 192–198.
KAN Lili, GONG Yawen, WANG Jingrong. *J Build Mater*, 2019, 22(2): 192–198.
- [22] ŞAHMARAN M, LI V C. Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under highly alkaline environments[J]. *Cem Concr Compos*, 2007, 30(2): 72–81.
- [23] ZHANG Z G, ZHANG Q. Self-healing ability of Engineered Cementitious Composites (ECC) under different exposure environments[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 156: 142–151.
- [24] 郭丽萍, 徐燕慧, 陈波, 等. 氯盐溶液干湿循环条件下高延性水泥基复合材料微裂缝的自愈合特性与微观机理[J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(7): 874–883.
GUO Liping, XU Yanhui, CHEN Bo, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2019, 47(7): 874–883.
- [25] JC/T 2461—2018 高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018.
- [26] 中国建筑材料材料科学研究总院等. GB/T 15231—2008 玻璃纤维增强水泥性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [27] HE H T, ZHU Y, ZHOU A G. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) used to evaluate influence of different external pressures, curing ages and self-healing environments on the self-healing behavior of engineered cementitious composites (ECC)[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 188: 153–160.
- [28] LIU H Z, ZHANG Q, LI V, et al. Durability study on engineered cementitious composites (ECC) under sulfate and chloride environment[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 133: 171–181.
- [29] 阚黎黎, 段贝贝, 闫涛. 高延性纤维增强偏高岭土-粉煤灰基地聚合物在不同环境下的自愈合性能[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(10): 2841–2850.
Kan L L, Duan B B, Yan T. *Acta Mater Comp Sinica*, 2018, 35(10): 2841–2850.
- [30] ÖZBAY E, ŞAHMARAN M, YÜCEL H E, et al. Effect of sustained flexural loading on self-healing of engineered cementitious composites[J]. *J Adv Concr Technol*, 2013, 11(5): 167–179.
- [31] 田佳龙. 海洋环境下 ECC 复合梁自愈合性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
TIAN Jialong. Study on self-healing performance of ECC composite

- beam in marine environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [32] 陆志博. 生态型超高韧性水泥基复合材料的基本力学性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- SUI Zhibo. Study on basic mechanical properties of eco-ultra-high toughness cement-based composites [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.
- [33] 苏骏, 范子康, 蔡新华, 等. 掺钢渣粉 PVA 纤维增强水泥基复合材料抗硫酸盐侵蚀性研究[J/OL]. 长江科学院院报, 1–10. [2024–10–01].
- Su J, Fan Z K, Cai X H, et al. J Yangtze River Scientific Res Ins, 1–10. [2024–10–01].
- [34] YIN Y Y, HU S W, LIAN J J, et al. Fracture properties of concrete exposed to different sulfate solutions under drying–wetting cycles[J]. Eng Fract Mech, 2022, 266: 108406.
- [35] 高丹盈, 赵亮平, 冯虎, 等. 钢纤维混凝土弯曲韧性及其评价方法[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 783–789.
- GAO Danying, ZHAO Liangping, FENG Hu, et al. J Build Mater, 2014, 17(5): 783–789.
- [36] 吴昊, 龙广成, 杨恺, 等. PE 纤维与细橡胶颗粒对泡沫混凝土弯曲韧性的影响[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(3): 206–214.
- Wu H, Long G C, Yang K, et al. J Build Mater, 2024, 27(3): 206–214.
- [37] 张鹏, 戴雨晴, 高凯凯, 等. 养护环境对掺有氧化镁膨胀剂的应变硬化水泥基复合材料裂缝自愈合的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(11): 1527–1537.
- Zhang P, Dai Y Q, Gao K K, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(11): 1527–1537.

Self-Healing Properties of Engineered Cementitious Composite Under Combined Action of Environment and Bending Tensile Loads

GONG Nina¹, WANG Zheyuan², HU Shaowei³, FAN Xiangqian⁴, LI Shuang², GENG Fangfang⁵, ZHANG Peng¹, LI Qiankun²

(1. Institute of Civil Engineering and Intelligent Management, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. College of Civil, Harbor and Coastal Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, Jiangsu, China;

3. Yellow River Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 4. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 5. School of Architecture Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Extended Abstract

Introduction ECC is characterized by high ductility and high toughness, and the generation of a large number of fine cracks gives the material a significant self-healing ability, thereby improving its safety and durability. In some northern regions of China, the soil pH value exceeds 9 in alkaline environments, sulfate content in marine environments can generally reach 1400–2700 mg/l, structures are typically subjected to dry–wet cycles in areas of water level fluctuations, and water is a necessary condition for the occurrence of self-healing. In order to comprehensively and systematically analyze the self-healing performance of ECC under different environments and preloading conditions, the tensile and flexural properties of ECC after self-healing under three environments (5% Na₂SO₄, saturated Ca(OH)₂, and water) were investigated in this paper, providing a basis for the further application of ECC materials in engineering practice.

Methods Three environments were designed: 1) 5% Na₂SO₄ solution (by mass) under dry–wet cycles; 2) Saturated Ca(OH)₂ solution under dry–wet cycles; 3) Water environment which served as a control group. The preloaded specimens were placed in them individually.

A total of 9 batches of dog-bone specimens under three different environments were prepared. The group preloading to 1% and 2% strain and the intact specimens without preloading were placed in the self-healing environment. After reaching the corresponding age, tensile tests were conducted to obtain stress-strain curves under different conditions, and the recovery of tensile strength and ultimate deflection was analyzed.

Besides, 9 batches of four point bending thin plates under three different environments were prepared, the ultimate strength was obtained from the intact specimens, and 20% and 40% of the value were selected as the preloading levels for bending tests. The preloaded group and intact specimens without preloading were placed in the self-healing environments for the flexural tests to obtain the load-deflection curves, the recovery of properties such as flexural strength, ultimate deflection, and flexural toughness were investigated.

Results and discussion Preloading to 1% strain gained a significant advantage in restoring the tensile strength of specimens at different ages in three different environments. The tensile strength of ECC was improved when subjected to dry–wet cycle in both Na₂SO₄ and Ca(OH)₂ solutions, with a superior recovery ability observed in the Ca(OH)₂ environment. It is also noted that under a 1% preload, the tensile strength increased by about 36.33% throughout the 90 d aging process.

Reloading after pre-tensioning led to a significant improvement on the tensile ductility of specimens at 0 d, with an increase in ultimate tensile strain of up to 138.4% with the preloading level increasing from 0% to 2%. The water environment had a significant effect on the ductile healing of intact specimens without preloading at long ages, with an increase in ultimate tensile strain of 137.52% with age from 0 d to 90 d, while the Na₂SO₄ and Ca(OH)₂ environments weakened the ductility of cracked ECC specimens, with the largest decreases of 52.78%–65.39% at 2% preloading, and the Na₂SO₄ environment had a better effect on the maintenance of

ductility in the specimens. At 90d of self-healing, increasing preloading levels weakened the tensile ductility of the specimens, with the greatest decrease in water.

Under the unsoaked condition, 20% preloading increased the flexural strength of the bent plate, but weakened the flexural ductility. As the age of self-healing increased, the initial flexural strength and ultimate flexural strength of the specimens under 40% preloading were improved, and Na_2SO_4 environment was more effective, with an increase of 28.91% and 40.35%, respectively, compared with that at 0 d. Preloading by 20% significantly increased the ultimate deflection, and the best effect was achieved in water, with an increase of up to 202.83% compared with 0 d. Flexural ductility was positively correlated with multi-seam cracking pattern. Na_2SO_4 and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ environments were effective in restoring the flexural strength of the specimens at a short age, and had a positive effect on the healing of microcracks. After 90 d of self-healing, the initial flexural toughness ratio and residual flexural toughness ratio of the preloaded 20% thin plate recovered best. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ environment was favorable to enhance the pre-peak flexural toughness, and the water environment was favorable to enhance the post-peak flexural toughness.

Conclusion The tensile and flexural properties of ECC after self-healing in three environments were investigated. The results showed good tensile and flexural self-healing properties. A 1% preloading level was clearly beneficial for tensile strength recovery at all ages in the three environments. Although Dry–wet cycling in Na_2SO_4 and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ enhanced the tensile strength of ECC, it reduced the tensile ductility of preloaded ECC specimens. The greatest decrease in ductility occurred at 2% preloading, and the Na_2SO_4 environment was more effective in maintaining it. After 90 d of self-healing, tensile ductility of the specimens decreased with increasing preloading levels. A 40% preloading level had the most significant effect on flexural strength recovery after long-term aging, particularly in the Na_2SO_4 environment. The ultimate deflection recovery of the specimen was most significant at a 20% preloading level, with better performance in water. Furthermore, 20% preloading significantly improved the flexural toughness after 90 d of self-healing.

Keywords engineered cementitious composite; environment action; self-healing; tensile properties; flexural properties