

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.085



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



环境湿度对损伤UHPC自愈合性能的影响

李悦¹, 董超¹, 丁敬翔¹, 宁哲², 罗安然¹

(1. 北方工业大学土木工程学院, 北京 100144; 2. 北京工业大学桥梁工程安全与韧性
全国重点实验室, 北京 100124)

摘要:为获得环境湿度对损伤超高性能混凝土(UHPC)自愈合性能的影响规律,通过加载使试件产生预裂缝,随后在持续浸泡、干湿循环、自然养护和隔绝空气4种环境下进行二次养护,并进行抗压、抗折试验和超声波检测。从表面特征、力学性能、密实度和微观形态方面评价UHPC的自愈合效果。结果表明:环境湿度对试件的自愈合性能影响显著,不同湿度下自愈率差异源于水分的迁移运输,缺水环境(隔绝空气、自然养护)下试件裂缝处未见明显愈合产物,试件的强度恢复率和密实度恢复率较低,饱水环境(干湿循环、持续浸泡)下试件裂缝处表观愈合产物丰富,愈合产物主要由 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和水化硅酸钙(C-S-H)凝胶组成,能有效修复裂缝,试件的强度恢复率和密实度恢复率较高;试件的强度恢复率和密实度恢复率随试件损伤程度的增加而增大,在持续浸泡环境中,相较损伤度为70%的试件,损伤程度为90%的试件抗压强度恢复率提高了16.59%,抗折强度恢复率提高了11.19%,密实度恢复率最大提高了64.43%。

关键词:超高性能混凝土;预损伤;自愈合;环境湿度;超声波检测

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2026)05-0045-07

Effect of environmental humidity on the self-healing performance of damaged UHPC

LI Yue¹, DONG Chao¹, DING Jingxiang¹, NING Zhe², LUO Anran¹

(1. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, P. R. China; 2. National Key Laboratory of Bridge Safety and Resilience, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China)

Abstract: In order to investigate the influence of environmental humidity on the self-healing performance of damaged ultra-high-performance concrete (UHPC), pre-cracks were induced in the specimens by loading, and then the specimens were subjected to secondary curing in four different environments: continuous immersion, wet-dry cycling, natural curing, and air-tight isolation. Subsequently, a series of rigorous evaluations was conducted, encompassing compressive and flexural tests, along with ultrasonic testing. The self-healing performance of UHPC were evaluated based on several criteria, including its appearance, mechanical

收稿日期:2025-03-05

基金项目:国家自然科学基金(51408009);北京市属高校基本科研业务费(110052971921/062);北方工业大学毓优人才支持计划(XN012/044)

作者简介:李悦(1979-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事建筑及结构物抗震减灾研究,E-mail:liyue@ncut.edu.cn。

Received: 2025-03-05

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51408009); Fundamental Research Funds for the Beijing's Universities (No. 110052971921/062); Yuyou Talent Project of North China University of Technology (No. XN012/044)

Author brief: LI Yue (1979-), PhD, professor, doctoral supervisor, main research interest: earthquake mitigation of buildings and structures, E-mail: liyue@ncut.edu.cn.

properties, compactness, and micro-morphology. The findings indicate that environmental humidity exerts a substantial influence on the self-healing performance of the specimens. The discrepancy in the self-healing rate across varying humidity environments can be attributed to the migration and transportation of water. In water-deficient environments (air-tight isolation and natural curing), no obvious healing products were observed at the cracks of the specimens, and the recovery rates of strength and compactness of the specimens were low. In water-saturated environments (wet-dry cycling and continuous immersion), abundant visible healing products were observed at the cracks in the specimens. These products were composed of calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) and calcium silicate hydrate (C-S-H) gel and were capable of effectively repairing the cracks. The recovery rates of strength and compactness of the specimens were superior in these environments. The recovery rates of strength and compactness of the specimens increased with the damage degree of the specimens. In the continuous immersion environment, compared with the specimens with a damage degree of 70%, the specimens with a damage degree of 90% had an increase of 16.59% in compressive strength recovery rate, an increase of 11.19% in flexural strength recovery rate, and a maximum increase of 64.43% in compactness recovery rate.

Keywords: ultra-high-performance concrete (UHPC); pre-damage; autogenous healing; ambient humidity; ultrasonic testing

作为一种优化级配的细颗粒与高比例纤维材料组成的新型复合材料,超高性能混凝土(UHPC)具有优异的耐久性^[1],在土木工程领域有广阔的应用前景^[2-3]。但由于水泥硬化产生收缩,UHPC在长期荷载作用下经常出现开裂和损伤^[4]。生成的裂缝会加快外部水分在UHPC构件内部的传输和侵蚀,引起钢纤维和钢筋锈蚀,严重影响结构安全。此外,对人工不易触及的钢筋混凝土构件进行维护非常困难^[5]。因此,开展损伤UHPC自愈合性能的研究对提高结构服役年限、降低结构维修成本具有重要意义和价值。

目前,水泥基材料自愈合技术主要有自主愈合和自生愈合两类^[6],其中,自主愈合通过添加SMA记忆合金^[7]、中空纤维^[8]、含自愈合促进剂的微胶囊^[9]和诱导细菌沉积^[10]等修复混凝土裂缝,这类外加材料成本较高,不适宜推广使用。自生愈合通过添加化学剂^[11]、自身膨胀剂^[12]和活性矿物掺合料^[13]等促进混凝土内部未水化的水泥颗粒进行二次水化作用来修补裂缝。

在UHPC自生愈合的研究中发现,试件的损伤程度^[14-15]和二次养护环境的湿度^[16]对水泥基材料自愈合性能影响较大。Zhong等^[17]发现,在盐环境中冻融200次的微裂纹UHPC试件愈合后的拉伸强度和抗压强度分别提高了28.0%和18.3%。安明喆等^[18]对预损伤UHPC试件进行抗压试验发现,相较于未养护试件,采用水浴环境进行二次养护的试件抗压强度最大提高了40.2%。Beglarigale等^[19]发现,经过30 d的自愈合养护后,预裂UHPC立方体试件

抗压强度超过了无损伤试件,最高恢复率达119%。葛晓丽等^[20]对不同水胶比的UHPC立方体试件进行高温(60℃)水浴环境养护发现,低水胶比试件抗压强度恢复率达40.8%,表明试件内水泥颗粒的二次水化作用对基体裂缝的愈合具有促进效果。谭昱等^[21]将带有微裂纹的UHPC试件放置在蒸汽环境中进行愈合养护发现,随着拉伸变形的增大,自愈合效果减弱,同时,试件微裂纹越多,自愈合产物填充所需时间越长。

在目前对UHPC自生愈合的研究中,二次养护环境的湿度设置比较单一,环境湿度对UHPC自愈合性能的影响规律仍不明确。笔者采用隔绝空气、自然养护、干湿循环和持续浸泡环境等不同湿度的养护条件,对UHPC试件开展预损伤后的二次愈合养护,并进行抗压和抗折试验,从表观特征、力学性能、密实度和微观形态方面分析试件的自生愈合效果,探究UHPC材料在不同湿度环境下的自生愈合规律和机理。

1 试验概况

1.1 材料及配合比

分别采用100 mm×100 mm×100 mm和100 mm×100 mm×400 mm的尺寸的UHPC试件进行抗压和抗折试验。采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥、硅灰、石英砂、钢纤维、减水剂和水制作试件。其中硅灰 SiO_2 含量为96.5%,比表面积为 $26 \text{ m}^2/\text{g}$;石英砂包含粗、中、细3种粒径,分别为1.23~0.63 mm、0.63~0.315 mm和0.315~0.16 mm;减水剂采用山西飞科新材料科技有限公司生产的纯减水型聚

羧酸高性能减水母液,减水率 $\geq 28\%$;采用平直镀铜钢纤维,长度为 13 mm,直径为 0.2 mm,长径比为 65,密度为 7 800 kg/m³,抗拉强度为 2 965 MPa,体积掺量为 2%;采用实验室自来水。通过前期文献调研确定 UHPC 材料的配合比及水胶比,最终 UHPC 试件的弹性模量为 50 626 MPa,抗压强度为 158.46 MPa。UHPC 材料的配合比见表 1。

表 1 UHPC 材料的配合比^[6,22-23]
Table 1 Material mix ratio of UHPC^[6,22-23]

水泥	硅灰	石英砂			钢纤维	减水剂	水
		粗砂	中砂	细砂			
1 090	300	420	210	70	158	25	228

1.2 试件制备与预损伤设置

1)试件制备

首先将水泥、石英砂和硅灰倒入搅拌机干拌 3 min;随后倒入水和减水剂搅拌 5 min,待浆体表现出较好的流动性后,持续均匀地加入钢纤维,搅拌 5 min 使钢纤维均匀分布于浆体中;最后将搅拌好的 UHPC 浆体倒入模具并在表面覆膜养护,24 h 后拆模,并在水中浸泡养护 28 d。

2)试件预损伤设置

采用单轴压缩试验对立方体试件进行预损伤裂缝的设置,加载速率为 2 kN/s,当达到 80% 规定荷载时减小至 1 kN/s。对于棱柱体抗折试件,采用三点弯曲的方法进行裂缝预制,加载速率为 0.5 kN/s,后期减小至 0.2 kN/s。分别取 70%、80% 和 90% 的试件极限抗压和抗折强度作为规定荷载^[16],以反映试件的损伤程度。预制裂缝后的抗压试件和抗折试件分别以 Y70、Y80、Y90 和 Z70、Z80、Z90 命名。抗折试件预损伤裂缝设置如图 1 所示。

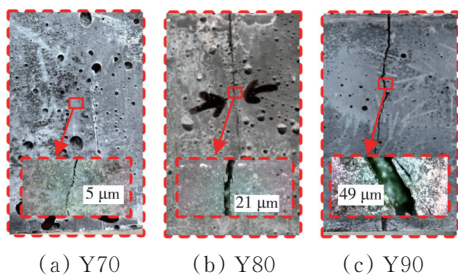


图 1 抗折试件预制裂缝

Fig. 1 Pre-cracks in flexural specimens

1.3 二次养护环境设置

构建 4 种湿度的二次养护环境,分别为隔绝空气环境(使用保鲜膜包裹试件,在内部放入干燥剂,以防止外界空气和水分进入)、自然养护环境(将试件静置在室内环境中,空气湿度为 50%)、干湿循环环境(将试件放入水箱 12 h 后取出,置于室内空气

环境 12 h,多次循环)、持续浸泡环境(将试件放入水箱持续浸泡至养护结束)。

2 结果与讨论

2.1 外观特征

采用显微相机观察并测量 UHPC 试件在自愈合前后的裂缝闭合度,评价试件的愈合效果。以预损伤 80% 的抗折试件为例,在不同湿度养护环境下,试件自愈合 28 d 前后的典型裂缝特征如图 2 所示。

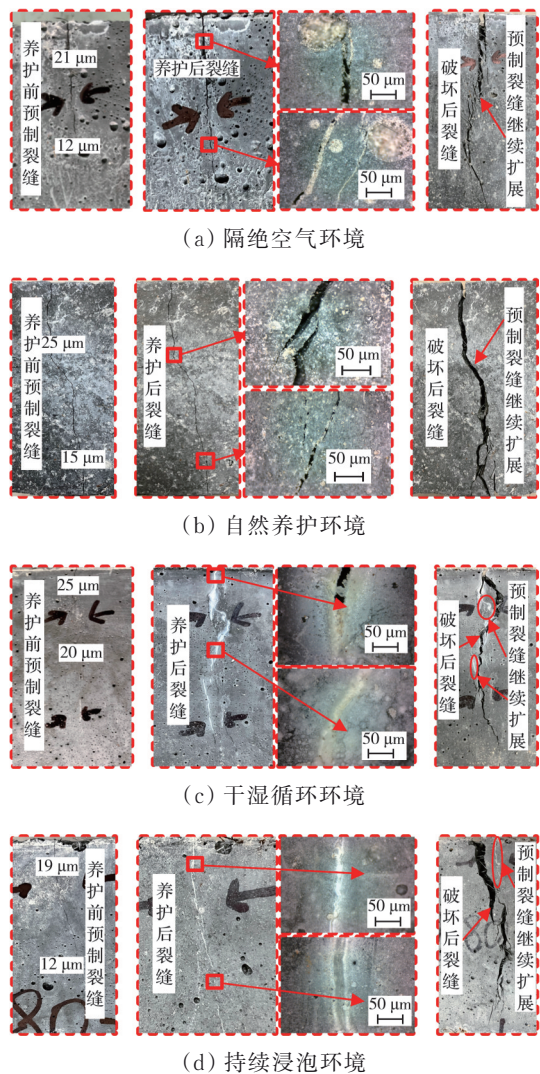


图 2 抗折试件裂缝愈合特征

Fig. 2 Crack healing characteristics of flexural specimens

在隔绝空气和自然养护环境下,经 28 d 二次养护后,试件的预制裂缝没有明显变化,其表面和内部均未观测到明显的愈合产物,裂缝愈合效果较差。二次加载时,试件沿预制裂缝继续扩张,直至破坏,如图 2(a)、(b)所示。而在干湿循环条件下,经 28 d 二次养护后,在试件底面最大宽度为 22 μm 的预制裂缝表面及内部,白色和淡黄色结晶体填补

了裂缝空隙,材料愈合效果较好。二次加载时,试件的破坏位置和走势与预制裂缝基本一致,但有部分区域的预制裂缝并未继续扩展,表明在干湿循环养护条件下试件存在一定的自生愈合,如图 2(c)所示。而经 28 d 持续浸泡环境二次养护后,在试件侧面多条裂缝中发现,丰富的白色和半透明结晶体填补了裂缝,仅部分宽度较大的裂缝未能完全闭合。二次加载时,愈合后的裂缝并未继续扩展,而宽度较大的裂缝存在扩张现象,但新生裂缝的延伸方向与原有裂缝并不一致,表明在持续浸泡环境中养护的试件自生愈合效果较好,如图 2(d)所示。

2.2 力学性能恢复

采用强度恢复率 R_1 反映二次养护后试件强度的恢复能力,计算方法如式(1)所示。

$$R_1 = \frac{F_r - F_t}{F_t} \times 100\% \quad (1)$$

式中: F_t 为未经二次养护加载后预损伤试件的强度; F_r 为二次养护后愈合试件的强度。

1) 抗压性能恢复

在不同环境中对 UHPC 抗压试件进行二次养护后,其应力-应变曲线和强度恢复率如图 3 所示。随着预损伤程度的增加,二次加载时试件的抗压强度较无损试件的标准强度 168.46 MPa 普遍下降,其中,损伤程度 70%、80% 和 90% 的试件二次加载抗压强度分别下降了 4.24%、20.65% 和 34.32%。

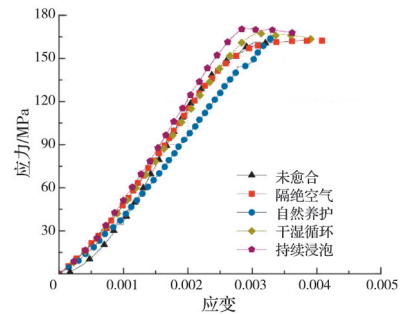
经二次养护后,相同损伤程度试件的抗压强度恢复率随环境湿度的增加而增大。相较隔绝空气环境,持续浸泡环境中试件 Y70、Y80 和 Y90 的抗压强度恢复率分别提高了 4.87%、9.93% 和 19.86%。这主要是由于高湿度环境下有充足的水分进入裂缝内部,与未水化的水泥颗粒发生二次水化反应,促进裂缝自生愈合,提高了试件的抗压强度恢复率。

在相同湿度条件下,随着损伤程度的增加,试件裂缝和孔隙体积不断增大,环境中的水分迅速与未水化的水泥颗粒发生反应,填补裂缝,使试件抗压强度恢复率增大。如在持续浸泡环境中,试件 Y90 的抗压强度恢复率比试件 Y70 高 16.59%。因此损伤程度大的试件具有更好的强度恢复能力。

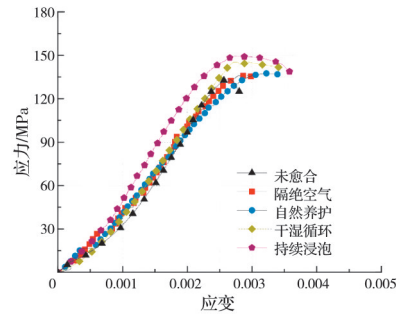
2) 抗折性能恢复

在不同环境中对 UHPC 抗折试件进行二次养护后,其荷载-挠度曲线和强度恢复率如图 4 所示。随着预损伤程度的增加,二次加载时试件的抗折强度较无损试件的标准强度 79.20 kN 普遍下降,其中损伤程度 70%、80% 和 90% 的试件抗折强度分别下降了 4.46%、9.34% 和 29.04%。

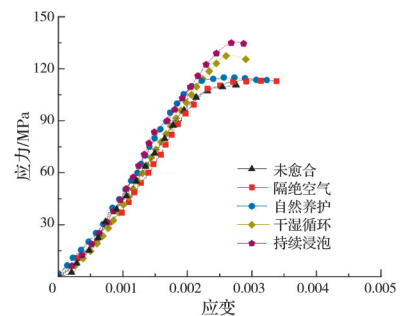
与抗压试件类似,经二次养护后,相同损伤程



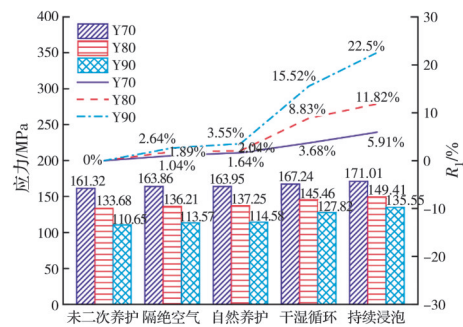
(a) 试件 Y70 的应力-应变曲线



(b) 试件 Y80 的应力-应变曲线



(c) 试件 Y90 的应力-应变曲线

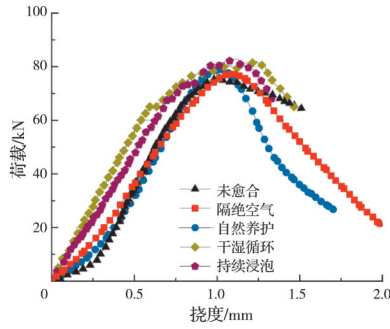


(d) 抗压试件的强度及恢复率

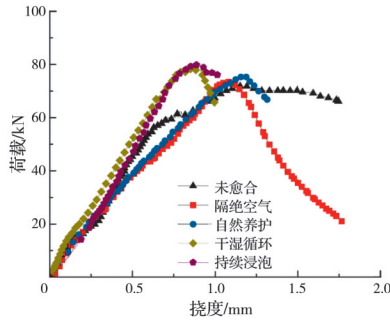
图 3 抗压试件的应力-应变曲线及抗压强度恢复率

Fig. 3 Stress-strain curves and compressive strength recovery rates of compressive specimens

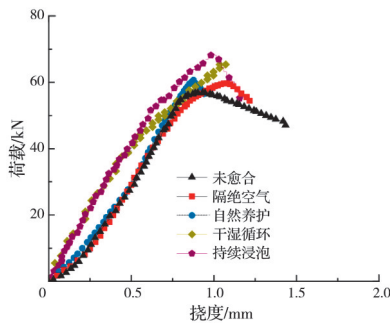
度试件的抗折强度恢复率随环境湿度的增加而增大。相较隔绝空气环境,持续浸泡环境中试件 Z70、Z80 和 Z90 的抗折强度恢复率分别提高了 7.3%、8.99% 和 15.48%。在相同湿度条件下,随着损伤程度的增加,试件的抗折强度恢复率也增大。如在持续浸泡环境中,试件 Y90 的抗压强度恢复率比试件 Y70 高 11.19%。



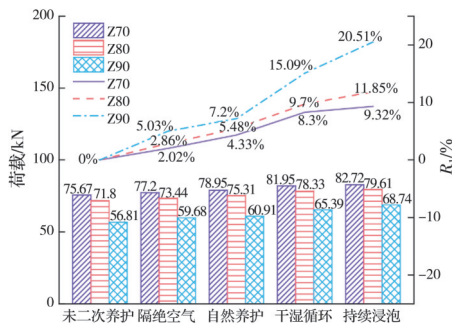
(a) 试件 Z70 的荷载-挠度曲线



(b) 试件 Z80 的荷载-挠度曲线



(c) 试件 Z90 的荷载-挠度曲线



(d) 抗折试件的荷载及恢复率

图4 抗折试件的荷载-挠度曲线及抗折强度恢复率

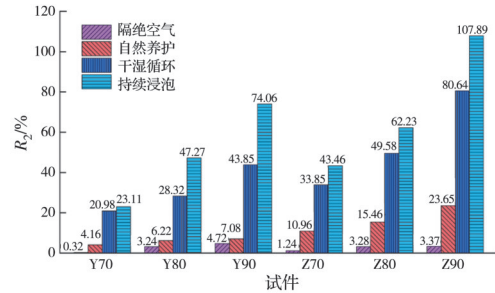
Fig. 4 Load-deflection curves and compressive strength recovery rates of flexural specimens

2.3 密实度恢复

采用超声波检测可以获得声波在试件内部的传播速度,当试件存在空洞和裂缝等缺陷时,会降低声波的传播速度。因此采用超声波波速的变化来反映试件的密实度状态, R_2 为试件二次养护后的密实度变化率,其计算方法见式(2)。

$$R_2 = \frac{V_r - V_t}{V_0 - V_t} \times 100\% \quad (2)$$

式中: V_r 为二次养护后试件的波速; V_t 为损伤试件的波速; V_0 为无损试件的波速。在不同环境中二次养护后,各组试件的密实度恢复率如图5所示。

图5 试件密实度恢复率 R_2 Fig. 5 Recovery rate of specimen compactness R_2

经二次养护后,试件的密实度恢复率随损伤程度的增加而增大。较隔绝空气环境,持续浸泡养护状态下抗压试件 Y90 的密实度恢复率提升了 69.34%,抗折试件 Z90 的密实度恢复率提升了 104.52%。

在相同湿度条件下,随着损伤程度的增加,试件密实度恢复率也呈增大趋势。在持续浸泡环境下,抗压试件 Y90 的密实度恢复率最大为 74.06%,较试件 Y70 提高了 50.95%;抗折试件 Z90 的密实度恢复率为 107.89%,较试件 Z70 提高了 64.43%。

2.4 微观形态及愈合产物分析

为了确定试件在愈合前后的表观形貌变化,使用扫描电子显微镜(SEM)对切开后的试件内部进行观察,如图6所示,并使用能量色散光谱(EDS)分析愈合产物的元素组成。

愈合 28 d 后,试件内部主裂缝和微小裂缝的微观形态如图6(a)、(b)所示,未水化的水泥颗粒与水反应形成的愈合产物主要聚集在裂缝表面,有效地修复了裂缝。进一步通过能量色散光谱(EDS)分析发现,愈合产物中的主要化学元素为氧(O)、钙(Ca)、硅(Si)和碳(C),因此推断愈合产物主要由未水化的水泥颗粒与水发生二次反应生成的硅酸钙(C-S-H)凝胶和氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$)组成,少量氢氧化钙与溶于水中的二氧化碳(CO_2)进一步反应生成碳酸钙(CaCO_3),能谱分析结果见表2。图6(c)、(d)为远离裂缝和靠近裂缝区域的纤维-基体界面的黏结形态,这两个区域的黏结界面存在显著差异。在远离裂缝的区域,钢纤维与基体之间存在间隙,黏结较松散。相较而言,靠近裂缝的区域由于水分渗透促进了二次水化反应,新生成的愈合物质有效地填充了纤维与基体之间的界面,使得二者的接触更加紧密。综上,水分的迁移运输是控制自愈率的

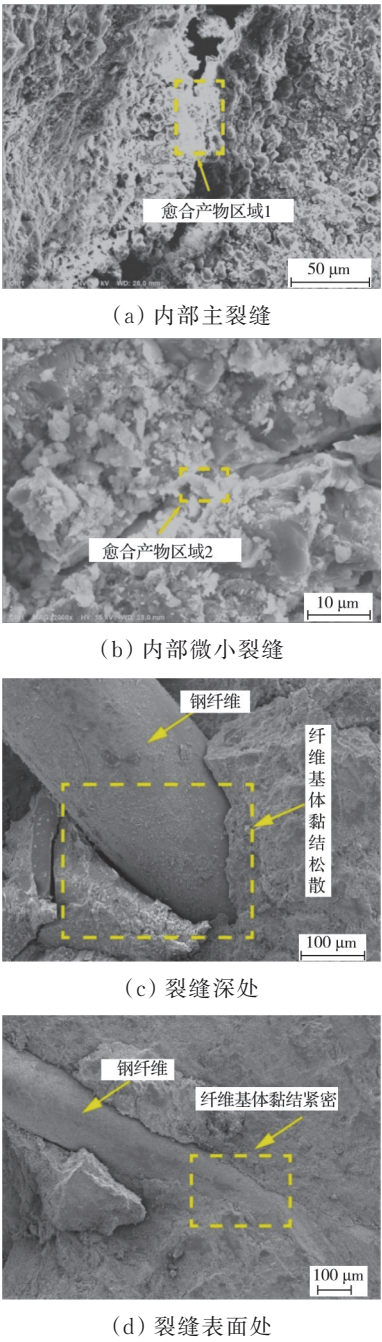


图 6 愈合后试件微观形态

Fig.6 Microscopic morphology of specimens after self-healing

表 2 EDS 元素分析结果

Table 2 Elemental results analysis by EDS

元素	区域 1 元素占比/%		区域 2 元素占比/%	
	质量	原子	质量	原子
O	50.65	62.28	46.76	62.05
C	10.86	17.85	6.10	10.79
Si	4.54	3.20	9.70	0.73
Ca	33.91	16.67	37.43	19.83
总计	100.00	100.00	100.00	100.00

关键因素。饱水环境下,充足的水分渗透至裂缝深处,使裂缝尖端区域未水化水泥得以持续水化,生

成愈合产物。而缺水环境下,水分匮乏限制了水化反应的深度和范围,导致愈合产物主要沉积在裂缝表层。

3 结论

通过对比不同湿度条件下损伤 UHPC 试件的自生愈合效果,得到环境湿度、损伤程度对试件自生愈合的影响,并确定了愈合产物的组成成分,研究发现:

- 1)环境湿度对 UHPC 试件自愈合产物的形成及裂缝闭合效果具有显著影响。饱水环境(干湿循环、持续浸泡)下试件裂缝内及附近均富集有丰富的愈合产物,裂缝闭合效果较好,缺水环境(隔绝环境、自然环境)下试件的愈合效果较差。
- 2)养护环境的湿度与试件的强度恢复率及密实度恢复率呈正相关。在持续浸泡环境中,试件的抗压强度恢复率最大为 22.5%,抗折强度恢复率最大为 20.51%,密实度恢复率最高为 107.89%。
- 3)在相同湿度条件下,损伤程度较高的试件表现出更高的强度恢复率和密实度恢复率,但过高的损伤程度会导致试件强度恢复难以接近峰值。
- 4)UHPC 试件裂缝的自愈合产物主要包括水化硅酸钙(C-S-H)凝胶和氢氧化钙(Ca(OH)₂),而 UHPC 在不同湿度环境下的自愈合率差异源于水分的迁移运输。由湿度控制的水分渗透能力决定了水化反应发生的深度范围及产物的沉积位置,是造成自愈效果差异的根本原因。

参考文献

[1] 岳秀鹏,肖靖林,甄倩倩,等.超高性能混凝土桥面板湿接缝受力性能试验研究[J].土木工程学报,2023,56(8):94-107.

Yue X P, Xiao J L, Zhen Q Q, et al. Experimental study on mechanical behavior of wet joints in ultra-high-performance concrete decks[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(8): 94-107. (in Chinese)

[2] 曹君辉,樊伟,李立峰,等.基于 UHPC 的高性能桥梁结构研究与应用[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(11):1-32.

Cao J H, Fan W, Li L F, et al. Research and application of UHPC-based high performance bridge structures [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(11): 1-32. (in Chinese)

[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 J S, Ding R. Development on ultra-high performance concrete in building structures[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(5): 1246-1258. (in Chinese)

- [4] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1-97.
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's bridge engineering research: 2021[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(2): 1-97. (in Chinese)
- [5] Nishiwaki T. Fundamental study on development of intelligent concrete with self-healing capability[D]. Sendai, Japan: Tohoku University, 1997.
- [6] 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 Q M, He B, Li C, et al. Review on cracks self-healing of ultra-high performance concrete[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(11): 2450-2461. (in Chinese)
- [7] 韩旭, 邢晓涛, 刘兵飞, 等. 基于应变传递模型的形状记忆合金混凝土结构裂缝损伤监测与修复研究[J]. 工程力学, 2025, 42(增刊1): 251-259.
Han X, Xing X T, Liu B F, et al. Research on crack damage monitoring and repair of shape memory alloy concrete structures base on strain transfer model[J]. *Engineering Mechanics*, 2025, 42(S1): 251-259. (in Chinese)
- [8] Dry C, Mcmillan W. Three-part methyl methacrylate adhesive system as an internal delivery system for smart responsive concrete[J]. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5(3): 297-300.
- [9] 袁金峰, 张丽梅, 王忠, 等. 微胶囊粒径对水工自修复混凝土力学性能的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2025(2): 193-200.
Yuan J F, Zhang L M, Wang Z, et al. Effect of microcapsule particle size on mechanical properties of hydraulic self-repairing concrete[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2025(2): 193-200. (in Chinese)
- [10] Zhang D, Shahin M A, Yang Y, et al. Effect of microbially induced calcite precipitation treatment on the bonding properties of steel fiber in ultra-high performance concrete[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 50: 104132.
- [11] Qian S, Zhou J, de Rooij M R, et al. Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(9): 613-621.
- [12] Wang Y S, Lee H S, Lin R S, et al. Effect of silicate-modified calcium oxide-based expansive agent on engineering properties and self-healing of ultra-high-strength concrete[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 50: 104230.
- [13] Ahmed T, Elchalakani M, Karrech A, et al. ECO-UHPC with high-volume class-F fly ash: new insight into mechanical and durability properties[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, 33(7): 04021174.
- [14] Ma Z M, Zhao T J, Yao X C. Influence of applied loads on the permeability behavior of ultra high performance concrete with steel fibers[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2016, 14(12): 770-781.
- [15] García Calvo J L, Pérez G, Carballosa P, et al. Development of ultra-high performance concretes with self-healing micro/nano-additions[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 138: 306-315.
- [16] 邓文琴, 杨在欣, 刘朵, 等. 不同养护环境下SAP对UHPC自愈合性能的影响[J]. 中国公路学报, 2025, 38(2): 185-196.
Deng W Q, Yang Z X, Liu D, et al. Effect of superabsorbent polymer on self-healing performance of ultrahigh-performance concrete in different curing environments[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2025, 38(2): 185-196. (in Chinese)
- [17] Zhong R, Ai X B, Pan M Y, et al. Durability of microcracked UHPC subjected to coupled freeze-thaw and chloride salt attacks[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2024, 148: 105471.
- [18] 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 M Z, Liu Y Z, Zhang G, et al. Influence of rehydration effect on microstructure and water stability of ultra-high performance concrete matrix[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 48(11): 1722-1731. (in Chinese)
- [19] Beglarigale A, Eyice D, Tutkun B, et al. Evaluation of enhanced autogenous self-healing ability of UHPC mixtures[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 280: 122524.
- [20] 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 X L, Liu J P, Wang Y J, et al. Effect of rehydration of unhydrated cement on ultra high performance concrete [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2016, 38(1): 40-45. (in Chinese)
- [21] 谭昱, 吕梁胜, 王俊颜, 等. UHPC微裂纹在蒸汽环境中的快速愈合机制[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 55-64.
Tan Y, Lyu L S, Wang J Y, et al. Rapid healing mechanism of UHPC microcracks in a steam environment[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(8): 55-64. (in Chinese)
- [22] Xiao J Z, Xie Q H, Xie W G. Study on high-performance concrete at high temperatures in China (2004—2016): an updated overview [J]. *Fire Safety Journal*, 2018, 95: 11-24.
- [23] Bai M Y, Xiao J Z, Ding T, et al. Interfacial bond properties between 3D printed engineered cementitious composite (ECC) and post-cast concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2025, 157: 105897.