第 49 卷第 11 期
2021 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 11
November，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200982

综 合 评 述

超高性能混凝土裂缝自愈合研究进展

郑乔木，何 倍，李 晨，蒋正武

(先进土木工程材料教育部重点实验室，同济大学材料科学与工程学院，上海 201804)

摘 要：超高性能混凝土(UHPC)是一种新型的水泥基材料，具有良好的裂缝自愈合潜力。对 UHPC 裂缝自愈合的研究进展进行了综述，归纳了 UHPC 基本特性及裂缝自愈合机理，讨论了裂缝自愈合行为对 UHPC 性能的影响，分析了最新的裂缝自愈合表征技术及自愈合理论模型，总结了目前 UHPC 裂缝自愈合研究中存在的关键问题，并提出了发展展望。

关键词：超高性能混凝土；裂缝；自愈合；性能恢复；表征技术；自愈合模型
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)11–2450–12
网络出版时间：2021–10–11

Review on Cracks Self-Healing of Ultra-High Performance Concrete

ZHENG Qiaomu, *HE Bei*, *LI Chen*, *JIANG Zhengwu*

(Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Ultra-high performance concrete (UHPC) is a type of cement-based material with good cracks self-healing potential. This paper reviewed the recent research progress on the cracks self-healing of UHPC. The basic characteristics of UHPC and the mechanism of cracks self-healing were summarized. The effect of cracks self-healing behavior on the performance of UHPC was discussed. The state-of-the-art characterization techniques and the theoretical models of cracks self-healing were analyzed. The major problems existing in the current research on the cracks self-healing of UHPC were summarized, and the development prospects were put forward.

Keywords: ultra-high performance concrete; cracks; self-healing; performance recovery; characterization techniques; self-healing models

混凝土作为最大宗的人造建筑材料，被广泛应用于大坝、储罐、海港、道路、桥梁、隧道、地铁等建设工程中。但随着结构朝着超高、超长、超大方向不断发展，它的一些不足逐渐凸显，如拉弯荷载承载力较低、韧性较差和耐久性不佳等问题。针对普通混凝土拉弯强度低、脆性高的缺点，将其复合化是提高混凝土性能的重要途径，而纤维增强便是其核心方法之一[1]。超高性能混凝土(UHPC)作为一种由优化级配的超细颗粒组分和高比例的不连续内掺纤维组成的新型强化胶凝复合材料[2–3]，其抗压强度高达 150~810 MPa，抗拉强度可达 10 MPa 以上，延展性和能量吸收性较普通混凝土高 300 倍。由于 UHPC 具有超高的力学和耐久性能，优良的耐磨、抗爆、抗冲击性，以及可有效降低结构自重等诸多优点，在未来工程中拥有广阔的应用前景[4]。虽然 UHPC 性能优异，但长期服役于严酷复杂环境中也会在外部因素诱导下形成微缝，并在持续承荷过程中逐渐扩展演化为宏观裂缝病害[5–6]，为有害离子的侵蚀提供通道，加速钢筋锈蚀、基体劣化，进而危及结构的安全。

收稿日期：2020–12–30。　修订日期：2021–01–23。
基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFC0705404)；国家自然科学基金资助项目(51878480, 52078369)；中央高校基本科研业务费专项资金资助。
第一作者：郑乔木(1998—)，男，博士研究生。
通信作者：蒋正武(1974—)，男，博士研究生导师，教授。

Received date: 2020–12–30.　**Revised date:** 2021–01–23.
First author: ZHENG Qiaomu (1998–), male, Doctoral candidate.
E-mail: 1910588@tongji.edu.cn
Correspondent author: JIANG Zhengwu (1974–), male, Ph. D., Professor.
E-mail: jzhw@tongji.edu.cn

传统维护作业中，在人眼不可见或人工不易接近的部位，以及在连续服役结构中进行人工修补非常困难[7]。因此，采用自愈合方法恢复甚至提高材料损伤后的性能，延长结构的服役寿命，是近些年混凝土技术需要突破的重要方向之一[8]。当今各类新兴的混凝土裂缝自愈合技术已被大量研究者们探索，这些技术可归为自主愈合和自生愈合 2 类：自主愈合是借助外来结构或组分，作为或诱导修复材料对基体裂缝进行愈合的一类技术，形状记忆合金[9–10]、中空纤维[11–13]、微胶囊封装[14–17]和细菌诱导沉积[18–22]等手段属于此类范畴；自生愈合指仅使用水泥基材料固有或常用组分，依靠自身内部水化或活性反应达到愈合的另一类技术，主要包括掺加膨胀剂[23–25]、化学添加剂[26–27]和矿物掺合料[28–31]等方法。这些技术各有优劣，因此很难断定哪种最为有效[32–34]。Tittelboom 等[35–36]认为，虽然未来裂缝自愈合的研究方向更可能向微胶囊或中空纤维等创新技术发展，但基于材料内部反应的自生愈合方法也在基体组分原始性和经济性等方面体现出明显优势。由于 UHPC 各项性能对组分的变化较为敏感，自主愈合技术在 UHPC 中的应用几乎空白，而自生愈合技术则具有较高价值。因此，综述了近年来 UHPC 裂缝自愈合的研究进展，并着重对 UHPC 裂缝自生愈合进行了分析与总结，以期其能在进一步提高 UHPC 使用效能和服役寿命方面提供一定的参考。

1　UHPC 基本特性及裂缝自愈合机理

1.1　UHPC 基本特性

相较于普通混凝土，UHPC 具有两大明显不同的基本特性。其一，UHPC 独特的材料组成使得其水化反应的发展进程与普通混凝土不同，UHPC 胶凝材料用量大，但水胶比很低(一般<0.20，水泥理论完全水化水胶比为 0.38[37])，基体内部存在大量未水化水泥熟料和辅助胶凝材料，因此具有极强的二次水化和火山灰反应能力[38–39]。其二，UHPC 致密的基体结构和纤维增韧效应也使其裂缝形成的几何特征异于普通混凝土。根据 MCS-EPFL[40]的规定，UHPC 可被划分为应变软化型(极限抗拉硬化应变<0.15%)和应变硬化型(极限抗拉硬化应变>0.15%)。应变硬化型 UHPC 又可细分为低应变硬化型(0.15%<极限抗拉硬化应变<0.2%)和高应变硬化型(极限抗拉硬化应变>0.2%)。图 1 为不同类型 UHPC 的全拉伸应力–应变曲线[41]。应变硬化型 UHPC 兼具优异的强度和良好的韧性，基体受到损坏时，常呈现多重微缝的开裂形式。由于纤维–基体的优良粘结性能和钢纤维超高的弹性模量，当拉伸应变达到 0.2%时(钢筋屈服应变附近)，高应变硬化 UHPC 的裂缝宽度一般仅为 20~30 μm，即使在应变硬化阶段裂缝宽度也不超过 50 μm，小于 PVA 纤维制造的工程复合胶凝材料(ECC)在同阶段的缝宽，具有很好的裂缝宽度控制能力[42]。相关研究表明，更窄的裂缝宽度有利于提高水泥基材料的自愈合效率，这一结论已在大量普通混凝土和 ECC 的微裂缝自愈合研究中得到证实[43–50]，但具有类似裂缝特征的 UHPC 自愈合研究仍处于初步探索阶段。

1.2　UHPC 裂缝自愈合机理

1.2.1　自生愈合　　Reinhardt 等[51]总结指出，普通水泥基材料裂缝的自生愈合行为主要源自 3 种途径(图 2)：第一是裂缝内壁面基体中的 C–S–H 凝胶等

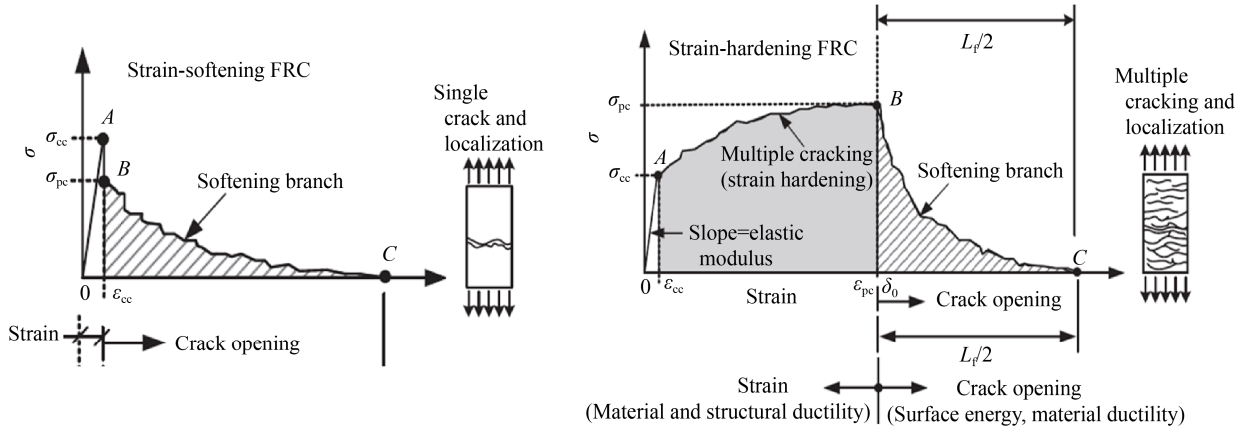


图 1　应变软化(a)和应变硬化(b) UHPC 全拉伸应力–应变曲线[41]

Fig. 1　Full tensile stress (σ)-strain (ε) curve of strain softening(a) and strain hardening(b) UHPC[41]

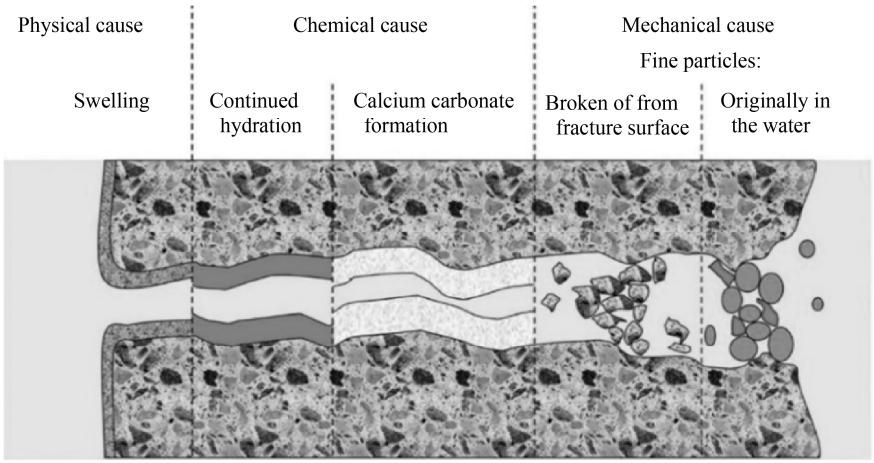


图 2 水泥基材料可能的裂缝自愈合原理[51]

Fig. 2 Schematic illustration of possible causes for the crack self-healing of cement-based materials[51]

组分发生溶胀，并将额外水分吸收到其结构间的空隙中，从而减小裂缝宽度以达愈合效果(此溶胀机制可使流体流量减少约 10%)；第二是组分中未水化胶凝材料二次水化，生成 C–S–H 凝胶等水化产物，或者水化产物中的 $Ca(OH)_2$ 与水、溶解的 CO_2 发生反应，生成 $CaCO_3$ 沉淀进行愈合(沉淀过程主要与温度，反应物浓度，孔溶液 pH 值有关[52])；第三是裂缝表面的剥落颗粒和水中原有杂质对裂缝进行填充，也可达到愈合作用。愈合产物中，二次水化产物与基体相容性较佳，通常从裂缝内部开始生长；$CaCO_3$ 沉淀与基体相容性稍弱，一般只能填充裂缝表面和较浅部位。因此，材料力学性能的恢复主要与二次水化产物的生长过程有关，而渗透性能的变化受 $CaCO_3$ 沉淀填充的影响更大[53]。

作为一种较为特殊的水泥基材料，UHPC 的自生愈合机理与之类似。Kim 等[54]认为，碳化反应是 UHPC 裂缝自愈合的主要原因。在潮湿的条件下，养护环境中的水会溶解空气中的 CO_2，并在不同的 pH 值条件下分别生成 CO_3^{2-}或 HCO_3^-，当 UHPC 受损开裂后，含有 CO_3^{2-}或 HCO_3^-的水会通过裂缝侵入到基体内部。随着水泥水化反应的进行，UHPC 基体内部生成大量 $Ca(OH)_2$，其释放的游离 Ca^{2+} 沿着裂缝表面弥散。当 Ca^{2+}在碱性环境中接触到水中的 CO_3^{2-}或 HCO_3^-，就会生成 $CaCO_3$ 沉淀，晶体在裂缝中生长积累，最终填充裂缝并完成愈合(图 3[54])。

Rajczakowska 等[55]则认为，UHPC 裂缝自愈合由二次水化和碳化的耦合反应共同完成。大气中的 CO_2 溶解在进入裂缝的水中，并与 UHPC 基体中 $Ca(OH)_2$ 提供的 Ca^{2+}优先发生反应，生成的 $CaCO_3$ 晶体封闭了裂缝开口，促进了裂缝内部离子浓度的增加。当达到过饱和度时，闭合的裂缝内部也会形成 C–S–H 凝胶和钙矾石等其它各类水化产物[56](图 4)。输送至裂缝中的 Ca^{2+}和 SiO_3^{2-}数量是调控裂

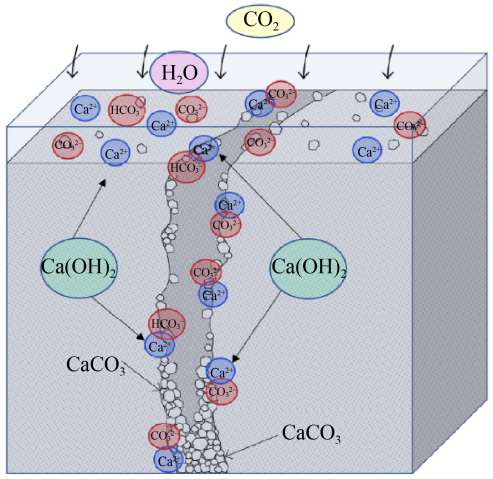


图 3 基于碳化反应的自愈合机理图[54]

Fig. 3 Self-healing mechanism diagram based on the carbonation reaction[54]

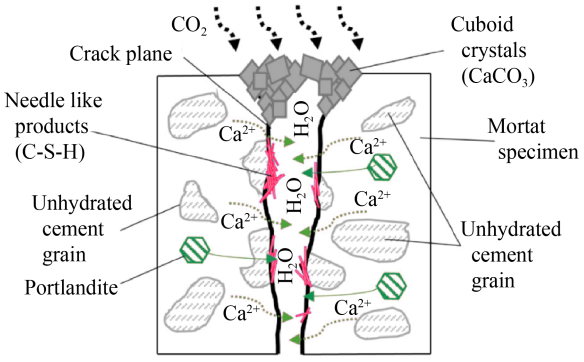


图 4 基于二次水化和碳化耦合反应的自愈合机理图[55]

Fig. 4 Self-healing mechanism diagram based on the continuous hydration and carbonation coupling reactions[55]

缝愈合进程的主要因素之一，故基体(尤其是凝胶相)的渗透性对所需离子的传输有重要影响[57]。因此，单从离子传输观点考虑，UHPC 高致密的结构特性可能会对其自愈过程具有抑制作用，其具体影响机制还未探明。

1.2.2　自主愈合　　受限于 UHPC 基体对组分变化敏感的特殊性，仅有极少数研究尝试性地采用微胶囊封装等自主愈合手段对 UHPC 裂缝的自愈合性能进行探索[58]。微胶囊封装是一种采用惰性壁囊材料将微米或纳米级别的固体颗粒、液滴或气体修复剂封闭隔离外界环境以避免引起不必要反应的技术。White 等[15]在 21 世纪初证实该技术对结构聚合物基材料的自愈合性能提升显著，并对其愈合机理给出如图 5[15]的解释：1) 基体开裂形成裂缝；2) 裂缝贯穿致使微胶囊破裂，毛细管作用将释放的修复剂输送到裂缝面；3) 修复剂与催化剂接触引发反应，生成的反应产物对裂缝完成填充闭合。此后，研究者们开展了众多将微胶囊技术应用于水泥基材料的自愈合研究并累积了丰富的成果，虽然各自方法稍有差异[16–17]，但其核心机理基本一致。相比于较为稳健的自生愈合方法，由于当前主流修复介质多与 UHPC 基体相容性不良，自主愈合手段在 UHPC 裂缝中的愈合效果欠佳，基体性能也难以得到保证。

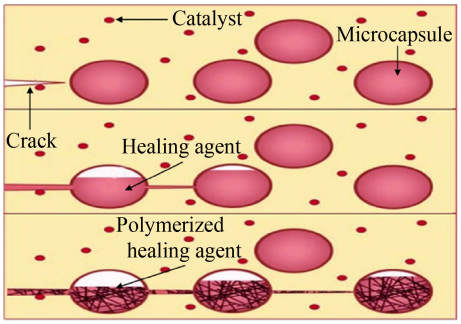


图 5　基于微胶囊技术的自愈合机理图[15]

Fig. 5　Self-healing mechanism diagram based on the microencapsulation technology[15]

2　裂缝自愈合行为对 UHPC 性能的影响

UHPC 的性能变化与裂缝自愈合进程密切相关，主要受损伤程度(荷载大小、裂缝宽度等)、养护条件(温度、湿度、pH 值、愈合时长等)和材料组成(纤维种类、胶凝材料体系等)等因素影响。表 1 对 UHPC 裂缝自愈合研究中所采用的试件尺寸及预裂控制方式等参数进行了总结。

表 1　UHPC 裂缝自愈合研究中的试件参数

Table 1　Specimen parameters in crack self-healing researches of UHPC

Pre-cracking control mode	Specimen size	SCM type	Water/binder ratio	Reference
Tensile strain	30 mm×150 mm×200 mm	Silica fume	0.22	Kunieda *et al*.[39]
	100 mm×100 mm×500 mm (dog bone)	Silica fume	0.18	Guo *et al*.[59]
Flexural strength	100 mm×30 mm×400 mm	Silica fume	0.20	Kim *et al*.[54]
	50 mm×100 mm×500 mm	Silica fume	0.20	Granger *et al*.[60]
Crack width	40 mm×40 mm×160 mm, h=25 mm and ϕ=100 mm (cylinder)	Silica fume	0.24	Calvo *et al*.[58]
	100 mm×30 mm×500 mm	Slag	0.18	Ferrara *et al*.[61]
Direct cutting	h=100 mm and ϕ=100 mm (cylinder)	Fly ash, Slag	0.22	Beglarigale *et al*.[62]
Compressive strength	100 mm×50 mm×300 mm	Fly ash, Silica fume	0.20	Ma *at al*.[63]

2.1　力学性能

2.1.1　抗拉性能　　Guo 等[59]将 UHPC 试件拉伸预裂至 0.1%应变后，分别置于室温水中、80% RH (相对湿度)和 45% RH 的养护环境中进行愈合。水中养护的 UHPC 愈合 28 d 后的弹性刚度可恢复至完整水平，而随着养护环境中水分含量的减少，愈合后 UHPC 的弹性刚度损失不断增大，45% RH 环境中愈合的 UHPC 刚度损失达一半以上。在初裂强度方面，水中和 80%RH 环境中养护的 UHPC 初裂强度分别恢复了 44%和 16%，而 45% RH 环境中养护的 UHPC 没有恢复。另外，3 d 蒸汽养护即可使愈合后的 UHPC 弹性刚度和初裂强度均优于 28 d 水中养护。

2.1.2　抗弯性能　　虽然单轴拉伸被认为是测定材料应变硬化性能最标准的方法，但有研究证实材料的弯曲和拉伸变形能力联系紧密[64]。Granger 等[60]将 UHPC 试件弯曲预裂至荷载后峰 2 kN 后，分别置于水中和空气中愈合 21 d 后发现，空气中养护的 UHPC 抗弯性能与预裂后立即二次加载的试件基本一致，而水中养护的 UHPC 抗弯强度则在预裂缝宽为 20 μm 时有约 40%的提升。Ferrara 等[61]研究认为，超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)梁的抗弯性能

恢复速率与愈合环境有直接关系，其抗弯强度在水中养护条件下恢复速率最快，而抗弯刚度在干湿循环环境中恢复效果最佳。

UHPC 在超低温等恶劣环境下的愈合行为也被研究人员所关注。Kim 等[54]将掺加 2%不同类型纤维的 UHPC 试件暴露于超低温环境中(–165 ℃) 1 h 后，再恢复至室温条件进行预裂和养护，预裂水平通过抗弯强度控制，其值为试件初裂强度与极限强度之和的 0.5 倍。在低温侵蚀后，掺加直钢纤维的 UHPC 抗弯强度和韧性最好，而掺加波浪钢纤维的 UHPC 抗弯性能损伤严重。空气中养护 3 d 足以使纤维长径比为 65 的试件抗弯性能完全恢复，但对于纤维长径比为 97.5 和 100 的试件还不足够。此外，掺加直钢纤维的 UHPC 经 28 d 水中养护后抗弯性能均完全自愈，而掺加波浪钢纤维的 UHPC 仅部分愈合。总体而言，掺加直钢纤维比波浪钢纤维更能有效地提高 UHPC 在超低温侵蚀后的弯曲性能，而低长径比纤维 UHPC 具有比高长径比纤维 UHPC 更好的自愈合效果。

2.1.3 抗压性能 葛晓丽等[65]将 UHPC 在 60 ℃水浴中养护 90 d 后发现，水浴后的 UHPC 抗压强度均有明显提升。其中，0.17 和 0.20 水胶比的 UHPC 抗压强度较水浴前分别增加了约 41%和 36%。Wang 等[66]却发现，水胶比为 0.20 的 UHPC 在 20 ℃水中浸泡 2 a 后，抗压强度降低了 14.5%。安明喆等[67]研究认为，UHPC 在 60 ℃水浴长期养护过程中，其抗压强度呈先升高后降低的趋势，虽然促进二次水化进程可以提升 UHPC 裂缝自愈合效率，但对于完整的 UHPC 基体，高致密的结构无法为新的水化产物提供生长空间，进而导致其膨胀受损。此种劣化现象一般只在高温水浴等快速和 1 a 以上的长期水化条件下发生，而在常温和短期养护环境中还无先例。

2.1.4 粘结性能 裂缝自愈合的本质是新生组分对裂缝的填充与桥接，因此 UHPC 基体间的粘结性能可直接反映其自愈合效果。Beglarigale 等[62]将圆柱形 UHPC 试件剪断后原位组装，并确保界面连续没有空隙，随后测量两部分基体在水中愈合 30 d 后的粘结荷载。在愈合过程中试件两部分以等荷载相互连接，并通过 3 个扭矩为 2.7 N·m 的长螺栓控制。结果表明，胶凝体系对 UHPC 基体的粘结性能具有重要影响，掺加占总胶凝材料用量 33%的粉煤灰和矿渣等高活性辅助胶凝材料可使 UHPC 的粘结性能显著提高，其粘结荷载分别达到 308 N 和 210 N，远高于纯水泥胶凝体系 UHPC 的 81 N。但掺加 66%的辅助胶凝材料会延缓 UHPC 胶凝体系的水化进程，从而降低了 UHPC 的短期(30 d)愈合效率，而对长期愈合性能的影响尚未可知。

2.2 传输性能

2.2.1 吸水性 作为最简单的传输指标，材料的吸水性能与微米级裂缝面积呈明显的正相关关系。Ma 等[63]研究表明，UHPC 在水中愈合 28 d 后的可视裂缝面积明显减小，内部裂缝较大程度闭合，其最大吸水量和毛细吸收系数较刚预裂时明显降低，基体密实性显著恢复。Calvo 等[58]也利用吸水性的变化对比了掺加封装环氧修复剂的微胶囊自主愈合 UHPC 和未掺修复剂自生愈合 UHPC 的裂缝愈合行为。试件在预裂后立即密封于塑料薄膜中愈合至规定龄期，结果发现，自主愈合 UHPC 愈合后的前期吸水率下降显著，在裂缝宽度为 150 μm 时，愈合 7 d 后 5%和 10%修复剂掺量 UHPC 的 6 h 吸水质量分别为 2.4 g 和 3.2 g，优于自生愈合 UHPC 的 4.0 g，表现出较好的愈合效果。愈合 28 d 后，自主愈合 UHPC 的前期吸水率已经降低至完整水平。然而，5%修复剂掺量 UHPC 的吸水率和总吸水质量均比 10%修复剂掺量 UHPC 少，自主愈合 UHPC 的总吸水质量也高于自生愈合 UHPC。上述结果说明修复剂掺量的不断提高并不会持续增加 UHPC 的愈合性能，且修复剂的掺入会对 UHPC 基体的原始性能造成不利影响，侧面论证了自生愈合方法的可靠性。

2.2.2 渗气性 由于 UHPC 高气密性的特点，渗气性的变化能较准确地反映基体裂缝的生成和闭合过程。Kunieda 等[39]研究表明，UHPC 拉伸至 0.2%应变开裂后，由于新生裂缝为气体的进入和贯穿提供了通道，渗气性指数显著上升。水中愈合 20 d 能使 UHPC 的渗气性指数降至极低的水平，平均恢复率可达 95%，而空气中养护的 UHPC 恢复速度较为缓慢。水中愈合 1 a 后，UHPC 的渗气性指数已经低于完整试件。Guo 等[59]则密切关注了 UHPC 在循环拉伸荷载下的渗气性变化，即使受 0.1%应变的循环荷载反复损伤，水中愈合 UHPC 试件的渗气性指数也能明显下降。水中养护 28 d 就能使 UHPC 的渗气性指数[0.002 4 ln[m/(bar·min^{-1})]低于完整试件[0.004 4 ln[m/(bar·min^{-1})]，且二次开裂后的渗气性指数也小于首次开裂后。说明水中养护环境能促进 UHPC 愈合产物对裂缝的填充，封闭气体的贯穿通道，提升基体的自愈合性能。在经历多一倍的循环荷载后，蒸汽养护 3 d 的 UHPC 渗气性指数

[0.002 5 ln[m/(bar·min^{-1})]仍与水中养护 28 d 相当，佐证了前文所得出的蒸汽养护环境中 UHPC 力学性能恢复效率比水中养护更佳的结论。

2.2.3　氯离子渗透性　　氯离子的渗透性能受材料孔结构特征、孔溶液化学状态等参数的影响很大[68]。UHPC 裂缝会直接为氯离子等侵蚀性物质提供传输通道，腐蚀基体内部的钢纤维，生成比原体积大 1 倍的锈蚀产物，致使裂缝进一步膨胀开裂[69]。因此，UHPC 开裂后能否及时封闭裂缝以阻止氯离子的侵害尤为重要。Ma 等[63]利用 UHPC 的氯离子渗透性研究了在其在不同压荷载预裂后的裂缝愈合行为。随着荷载的增大，UHPC 内部裂缝逐渐增多，裂缝宽度增大，宏观上表现为氯离子渗透率的明显升高。在饱和 $Ca(OH)_2$ 溶液中愈合 28 d 后，低荷载预裂(极限抗压强度的 30%)的 UHPC 氯离子渗透率可恢复至未预裂水平，高荷载预裂(极限抗压强度的 50%和 80%)的 UHPC 氯离子渗透率也显著降低。裂缝溶胀和残余形变恢复所导致的裂缝宽度减小是 UHPC 传输性能初期恢复的主要原因，而其后期恢复则由二次水化产物的生成以及结晶沉淀对裂缝的填充来实现。

综上所述，养护环境的水分含量是影响 UHPC 裂缝自愈合效率的关键因素，充足的水分对 UHPC 的自愈合行为具有积极作用。相较于常温养护，高温蒸汽和水浴等养护方式可以促进 UHPC 胶凝组分的二次水化进程，提升 UHPC 裂缝的愈合效率，但过快的水化反应可能会在愈合裂缝的同时导致基体膨胀开裂，从而劣化 UHPC 的各项性能。适量活性矿物掺合料对 UHPC 裂缝自愈合具有促进作用，低长径比纤维较高长径比纤维 UHPC 愈合效果更佳。另外，修复介质与 UHPC 基体相容性较差是自主愈合技术在 UHPC 裂缝中应用的主要瓶颈，如何在利用修复介质提升裂缝愈合效率的同时保持 UHPC 的优良性能是未来 UHPC 裂缝自愈合研究所需突破的重要课题之一。

3　UHPC 裂缝自愈合微观表征技术

在材料的愈合进程中，力学性能和传输性能的恢复分别由材料结构的再生(主要为二次水化产物生长)和裂缝空间的填充(主要为 $CaCO_3$ 等沉淀堆填)实现，二者均与裂缝的闭合过程密切相关，愈合产物的生成与沉积则是决定性因素。除了通过力学和传输等宏观性能对材料的自愈合行为进行反映，各类裂缝愈合的微观表征技术也被研究者们证实行之有效。相较于宏观性能间接反映愈合效率，微观技术能直接针对病害裂缝的愈合状态进行监测。表 2 对水泥基材料裂缝愈合研究中采用过的微观表征技术进行了总结，并单独列出了在 UHPC 中使用到的最新表征手段。

3.1　显微技术

显微观测是最常被使用的微观表征手段之一。众多研究者通过 SEM 监测了 UHPC 微裂缝在水中

表 2　水泥基材料裂缝自愈合微观表征技术

Table 2　Microscopic characterization technologies of cement-based materials cracks self-healing

Self-healing type	Matrix type	Self-healing method	Characterization method	Reference
Autogenous	Mortar	Rehydration	SEM	An *et al*.[67]
	Normal concrete	Expansive polymer, Rehydration and carbonation, Carbonated steel slag aggregate	OM, TGA, SEM, XRD, UPV, FTIR,	Snoeck *et al*.[70],Hosoda *et al*.[71], Pang *et al*.[72]
	HPFRCC	Rehydration and carbonation	OM, SEM, EDS	Ferrara *et al*.[61], Ahn *et al*.[73]
	UHPC	Rehydration and carbonation	OM, SEM, BSEM, EDS, UPV, AE	Kunieda *et al*.[39], Kim *et al*.[54], Rajczakowska *et al*.[55], Guo *et al*.[59], Granger *et al*.[60,74], Beglarigale *et al*.[62]
Autonomous	Cement paste	Encapsulated mineralization bacteria, Healing agent with Ca^{2+} ions	ESEM, EDS, TGA, FTIR	Liu *et al*.[75], Ye *et al*.[76]
	Mortar	Epoxy resin, Carbonate precipitating bacteria, Microcapsule with healing agent	FESEM, SEM, EDS, OM, AE	Farhayu *et al*.[77], Rahman *et al*.[78], Xu *et al*.[79], Li *et al*.[80,81]
	Reinforced mortar	Carbonate precipitating bacteria	SEM	Stuckrath *et al*.[82]
	Normal concrete	Polymer encapsule, Bacteria encapsule, Carbonate precipitating bacteria	SEM, EDS, XRD, OM,	Feiteira *et al*.[83], Wang *et al*.[84], Virginie *et al*.[85], Luo *et al*.[86], Khaliq *et al*.[87]
	UHPC	Epoxy healing agent	BSEM, X-CT	Calvo *et al*.[58]

Note: OM is optical microscopic, UPV is ultrasonic pulse velocity, AE is acoustic emission.

愈合的闭合过程[39,54–55,62]。Kim 等[54]连续监测了 UHPC 在 0、1、3、7 d 和 28 d 愈合时间后的裂缝形貌变化。随着愈合时间的延长，微裂缝逐渐被 $CaCO_3$ 结晶颗粒沉积填充。UHPC 自愈合 7 d 后，裂缝就已经能观察到明显的填充，而自愈合 28 d 后，裂缝已经完全闭合，且晶体填充物与 UHPC 基体无明显边界，二者具有良好的相容性。这证明了对于宽度较小的裂缝(普通混凝土认为应小于 60~200 μm[88–91])，UHPC 具备非常可观的自生愈合能力。Rajczakowska 等[55]进一步采用图像处理软件，根据裂缝像素点面积的变化定量表征了裂缝的闭合效率。UHPC 在愈合 21 d 后，平均裂缝闭合率达到 0.62，介于未掺粉煤灰和掺加 20%粉煤灰的普通混凝土之间。但是 UHPC 裂缝的闭合率波动较大，最高可达 0.83，最低仅为 0.40，其标准差明显大于普通混凝土组别。理论而言，更宽的裂缝具有更快的愈合动力学过程，但较窄的裂缝闭合率通常大于较宽的裂缝，表现出更好的自愈合性能。由此可见，裂缝宽度可能会影响愈合产物在其中的生长与沉积过程，其具体的影响机制还需进一步研究。

3.2 X 射线断层扫描技术

作为当今新兴的材料表征方法，X 射线断层扫描技术(X-CT)因其独特的三维断面成像和高密度分辨力等优势受到众多研究者们的青睐。Calvo 等[58]便采用此技术监测了 UHPC 自愈后不同深度剖面裂缝的闭合情况。在 X-CT 图像中，未掺修复剂的 UHPC 在 3 个不同深度的裂缝路径及其边界都可被很清晰地观察到，说明裂缝未发生明显的愈合现象。相反，5%掺量修复剂的 UHPC 中某些裂缝很少被识别出来，而当能清晰地看到裂缝边界时，它们呈现出不连续的路径，这表明修复剂对裂缝的填充作用效果显著，但不足以使裂缝完全闭合。

3.3 超声脉冲与声发射技术

声活动的增加通常是构件结构变化的敏感前兆[92]。超声脉冲技术通过声波速度主动表征材料密实度的演变，而声发射技术通过分析材料在发生位错、微裂等不可逆变化时产生的微震波特征被动反映其内部结构的变化过程。相关研究[39,55]均表明超声脉冲技术能够较好地表征 UHPC 裂缝的愈合过程。而 UHPC 受损时基体生成微裂缝以及纤维与基体的脱粘过程是典型的声发射源，因此也可对 UHPC 的开裂和自愈合行为进行有效地分析[80–81]。水泥基材料是典型的 Kaiser 效应材料，该效应表明对于已受损材料，再次破坏致初次受损程度前，材料不会产生明显的声发射信号[92]。因此，二次破坏过程中声发射信号的产生与否，以及声发射信号的数量可以定性和半定量地表征水泥基材料的愈合行为。Granger 等[60]发现，自愈合 70 d 后的 UHPC 在二次受弯开裂过程中的声发射累计事件数明显高于未愈合的 UHPC，约为未愈合 UHPC 的 2 倍。二次开裂时，桥接在 UHPC 微裂缝间的新生晶体会再次断裂，产生新的声发射信号，故生成的愈合产物越多，声发射事件数越多。Guo 等[59]也采用事件数变化表征了在不同养护环境中 UHPC 的自愈合性能。二次破坏时，常温水中养护的 UHPC 在拉伸至 0.009%应变阶段未出现声源信号，初始应变阶段的弹性刚度完全恢复。在拉伸至 0.1%的预裂应变时，随着养护环境中水分含量的升高，UHPC 的声发射事件数越接近首次开裂，说明养护环境中水分越充足，UHPC 自愈合效果越好。除了事件数，声发射被动测试中最具代表性的几个参数，能量、幅度和振铃计数等虽能良好表征普通混凝土自愈合过程[80–81]，却在 UHPC 自愈合研究中鲜有应用，主要原因是 UHPC 高弹模钢纤维与基体的拉拔信号过于强烈，对基体破坏所产生的信号具有很强的掩盖和稀释效应，使得声发射对愈合性能的表征精度受限。因此，区分 UHPC 损坏过程中的基体–基体破裂信号和纤维–基体拔出信号是将声发射技术应用到 UHPC 自愈合研究中所需突破的科学要点之一。

4 UHPC 裂缝自愈合模型

持续的二次水化反应是目前研究者建立 UHPC 裂缝自愈合模型并将其外推到各类宏观性能恢复模拟表现上的核心理论。Liu 等[93]基于 Krstulović–Dabić 水泥水化微观动力学方程和最小耗能原理提出了 UHPC 的二次水化模型，该模型通过水泥颗粒水化半径而实现水化进程模拟。Jiang 等[94–95]采用 CEMHYD3D 软件模拟了基于二次水化反应的裂缝结构重构进程，并基于此建立了 UHPC 氯离子渗透性恢复模型。Hilloulin 等[96]则通过矿物溶解水化模型总结并建立了 UHPC 弯曲力学性能恢复模型。

4.1 氯离子渗透性恢复模型

Jiang 等[94–95]采用“Random walking”随机有限元手段建立了氯离子在 UHPC 裂缝中的扩散模型，并根据氯离子扩散系数模拟表征了宽度为 10、30 μm 和 50 μm 的 UHPC 裂缝在不同胶凝体系中的自愈合性能。在被水饱和的水泥基材料中，氯离子

的传输形式主要是扩散行为，根据质能守恒定律，在忽略水泥基材料对氯离子结合作用的条件下，传输方程可写为式(1)和式(2)：

$$\int_v \mathrm{d}V + \int_s n \cdot J \mathrm{d}S = 0 \tag{1}$$

$$J = D_{\mathrm{Cl}} \frac{\partial \varphi}{\partial X} \tag{2}$$

式中：V 为扩散项体积；S 为扩散项表面积；n 为垂直于 S 的向外方向；J 为扩散相的浓度流量；φ 为氯离子浓度通量；X 为裂缝距离表面深度。随着预裂裂缝宽度的增加，氯离子的传输通道增多，UHPC 的氯离子扩散系数升高，且自愈合效率呈下降趋势。就宽度为 50 μm 的裂缝而言，在愈合初期，硅灰–粉煤灰–水泥三相体系 UHPC 中的氯离子扩散系数降低速率比水泥单相体系和硅灰–水泥两相体系更慢。但在自愈合后期，三相体系 UHPC 的氯离子渗透系数降低速率明显快于单相和两相体系。水中愈合约 3 000 h 时，三相胶凝体系 UHPC 裂缝中的氯离子扩散系数已经略低于单相和两相体系。这说明粉煤灰的掺入虽然会延缓 UHPC 的初期自愈合进程，但会提升其后期自愈合性能。此现象可能是由粉煤灰颗粒较水泥和硅灰颗粒早期水化速率更慢，但持续水化程度更高引起的。

4.2　弯曲力学性能恢复模型

基于 UHPC 弯曲力学性能恢复的自愈合模型的建立是一个渐进的过程，根据已经建立的水泥基材料损伤演化[97–98]、裂缝水分渗入[99–101]和矿物溶解水化[102–103]模型，Hilloulin 等[96]总结提出了 UHPC 在损伤开裂后基于弯曲力学性能恢复的水合-化学-力学自愈合模型，如式(3)所示：

$$V_{\mathrm{k}}^{\mathrm{p}}(t) = \sum_l^n \left(V_0^{\mathrm{i}} \frac{n_{\mathrm{k}}^{\mathrm{p}} M_{\mathrm{k}}}{n_l^{\mathrm{R}} M_l} \frac{\rho_{\mathrm{c}}}{\rho_{\mathrm{k}}} \right) \xi_l(t) \tag{3}$$

式中：V_0^{i} 为混凝土中剩余熟料；$V_{\mathrm{k}}^{\mathrm{p}}$ 为新形成的水合物；M 为摩尔质量；ρ 为质量密度；n 为物质的量。指数 ρ 代表产物(熟料)；l 代表反应物；c 代表水泥。对于损伤的 UHPC 结构，Hilloulin 采用两相模型对裂缝进行简化，并利用模拟数值曲线与实际曲线对比分析了二次加载过程中损伤区恢复程度对 UHPC 力学性能恢复的影响。结果发现，一个具有与原始材料相近力学性能的相对较小的愈合区(愈合区高度为裂缝高度的 1/10)就可以使 UHPC 的抗弯性能大幅回升。而愈合区的数量和力学性能随时间的提升可以解释 UHPC 结构性能随时间的演化进程。值得注意的是，初始斜率末端荷载的模拟数值总是高于实际值，随后荷载才出现小幅下降。这是由于在简化的裂缝两相模型中，力学性能在两相之间并非连续，对于未愈合材料，刚度的模拟数值和实际结果无法比较。该力学模型虽然能重现 UHPC 的刚度与裂缝宽度的下降过程，但不能重现由于裂缝尖端摩擦而导致试件刚度恢复较小的迟滞行为。

5　总结与展望

5.1　总结

1) 由于独特的材料组成和结构特点，UHPC 内部存在大量未水化胶凝材料，并且通常具有出色的应变硬化性能，极强的二次水化和火山灰反应能力以及多重微缝的开裂形式为其良好的裂缝自愈合潜力提供了可靠基础。

2) 外部因素方面，UHPC 损伤程度越低，裂缝宽度越小，裂缝自愈合效果越好；充足水分的养护环境对 UHPC 裂缝的自愈合最为有效，但高温蒸养和水浴等快速水化条件可能在促进裂缝愈合的同时劣化基体，长期(＞1 a)的水中养护也会导致类似的现象。

3) 内在组分方面，胶凝材料体系和纤维类型对 UHPC 裂缝的自愈合性能有重要影响，适量粉煤灰和矿渣等高活性矿物掺合料对 UHPC 裂缝自愈合行为具有积极作用，低长径比纤维 UHPC 的裂缝自愈合效率也优于高长径比纤维。

4) 表征技术方面，虽然 UHPC 裂缝的自愈合效率可以通过宏观性能和微观技术进行综合表征，但各类手段的评价参数指标还未完善和统一，且如声发射等部分技术的应用仍存在科学难点。

5) 理论模型方面，基于二次水化反应的自愈合模型已经能较好地模拟 UHPC 的氯离子渗透和弯曲性能的恢复行为，但基于二次水化和碳化耦合反应的自愈合模型还未建立。

5.2　展望

微米级裂缝在绝大多数时候都会对 UHPC 的力学性能和耐久性能造成负面影响，虽然很难将它们完全消除，但尽可能减小裂缝形成宽度，便能利用有效的自愈合技术将其损害降到最低。研究人员已经对 UHPC 微米级裂缝的自愈合性能进行了初步的研究，但仍存在诸多亟待探明和解决的关键问题：

1) 宏–介观方面，UHPC 强度恢复的主要来源尚不明确，虽然学者们普遍认为基体裂缝的填充和粘结行为是 UHPC 性能恢复的主要原因，但纤维-基体界面结构的愈合进程对其的影响却鲜有研

究。作为一种主要由纤维提供拉弯性能的材料，后者或许同样对 UHPC 性能(尤其是力学性能)的恢复具有卓越贡献。

2) 微观方面，研究者们一般仅侧重对裂缝表面填充产物的成分分析，而忽略了对裂缝内外局部水化程度的差异以及各深度和界面处愈合产物生长分布的探究，UHPC 开裂后水化反应进程与裂缝愈合效率的潜在联系仍待建立。

3) 愈合技术方面，关键的技术瓶颈亟需突破：如何在尽可能加速 UHPC 裂缝愈合进程的同时防止基体劣化，以及如何改善修复介质与 UHPC 基体的相容性以良好应用自主愈合手段是两组极具价值的 UHPC 裂缝自愈合课题。

总体而言，不同影响因素下 UHPC 裂缝愈合产物的生长与沉积形式、UHPC 基体结构重构进程与宏观性能恢复的内在关系以及 UHPC 裂缝自愈合行为的主动调控机制等是未来研究的重点方向。

参考文献:

[1] 吴中伟. 纤维增强-水泥基材料的未来[J]. 混凝土与水泥制品, 1999(1): 5–6.
WU Zhongwei. China Concr Cem Prod (in Chinese), 1999(1): 5–6.

[2] 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.

[3] YOO D Y, BANTHIA N. Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast[J]. Constr Build Mater, 2017, 149: 416–431.

[4] YOO D Y, KANG S T, YOON Y S. Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC[J]. Constr Build Mater, 2014, 64: 67–81.

[5] YUNOVICH M, THOMPSON N G. Corrosion of highway bridges: Economic impact and control methodologies[J]. Concr Int, 2003, 25(1): 52–57.

[6] BETTIGOLE N H. Rebuilding our bridges-why and how[J]. ASTM Stand News, 1994, 22: 24–27.

[7] NISHIWAKI T. Fundamental study on development of intelligent concrete with self-healing capability[D]. Tohoku University, Japan, 1997.

[8] 蒋正武. 水泥基自修复材料: 理论与方法[M]. 上海: 同济大学出版社, 2016: 1–28.

[9] 陶宝祺, 梁大开, 熊克, 等. 形状记忆合金增强智能复合材料结构的自诊断、自修复的研究[J]. 航空学报, 1998, 19(2): 250–252.
TAO Baoqi, LIANG Dakai, XIONG Ke, et al. Acta Aeronaut Astronaut Sin (in Chinese), 1998, 19(2): 250–252.

[10] WU B, OU Y L. Experimental study on tunnel lining joints temporarily strengthened by SMA bolts[J]. Smart Mater Struct, 2014, 23(12): 1–10.

[11] DRY C. Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices[J]. Smart Mater Struct, 1999, 3(2): 118–132.

[12] DRY C. Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials[J]. Compos Struct, 1996, 35(3): 263–269.

[13] DRY C, MCMILLAN W. Three-part methylmethacrylate adhesive system as an internal delivery system for smart responsive concrete[J]. Smart Mater Struct, 1999, 5(3): 297–300.

[14] DONG B, FANG G, WANG Y, et al. Performance recovery concerning the permeability of concrete by means of a microcapsule based self-healing system[J]. Cem Concr Compos, 2017, 78: 84–96.

[15] WHITE S R, SOTTOS N R, GEUBELLE P H, et al. Autonomic healing of polymer composites[J]. Nature, 2001, 409(6822): 794–797.

[16] BOH B, ŠUMIGA B. Microencapsulation technology and its applications in building construction materials[J]. Mater Geoenviron, 2008, 55: 329–344.

[17] JIANG Z W, LI J, LI W T. Preparation and characterization of autolytic mineral microsphere for self-healing cementitious materials[J]. Cem Concr Compos, 2019, 103: 112–120.

[18] JEFF H D, YASUDA H Y. Self-healing materials: An alternative approach to 20 centuries of materials science[J]. Chem Int-Newsmag IUPAC, 2008, 30(6): 20–21.

[19] JONKERS H M, THIJSSEN A, MUYZER G, et al. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete[J]. Ecol Eng, 2010, 36(2): 230–235.

[20] DICK J, WINDT W D, GRAEF B D, et al. Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by Bacillus species[J]. Biodegradation, 2006, 17(4): 357–367.

[21] XU J, YAO W. Multiscale mechanical quantification of self-healing concrete incorporating non-ureolytic bacteria-based healing agent[J]. Cem Concr Res, 2014, 64: 1–10.

[22] LING H, QIAN C X. Effects of self-healing cracks in bacterial concrete on the transmission of chloride during electromigration[J]. Constr Build Mater, 2017, 44: 406–411.

[23] LI W T, DONG B Q, YANG Z X, et al. Recent advances in intrinsic self-healing cementitious materials[J]. Adv Mater, 2018, 30(17): 1705679.

[24] KISHI T, AHN T H, HOSODA A, et al. Self-healing behavior by cementitious recrystallization of cracked concrete incorporating expansive agent[C]// Proceedings of First International Conference on Self-Healing Materials, The Netherlands, 2007: 1–10.

[25] SISOMPHON K, COPUROGLU O, KOENDERS E A B. Surface crack self-healing behaviour of mortars with expansive additives[C]// 3rd International Conference on Self-Healing Materials, UK, 2011: 44–45.

[26] AHN T H, KISHI T. Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various miner admixtures[J]. J Adv Concr Technol, 2010, 8: 171–186.

[27] QIAN S, ZHOU J, ROOIJ M R D, et al. Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials[J]. Cem Concr Compos, 2009, 31(9): 613–621.

[28] YANG Y, 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.

[29] KAN L L, SHI H S, SAKULICH A R, et al. Self-healing characterization of engineered cementitious composite materials[J]. ACI Mater J, 2010, 107(6): 617–624.

[30] HERBERT E, LI V. Self-healing of microcracks in engineered cementitious composites (ECC) under a natural environment[J]. Materials, 2013, 6(7): 2831–2845.

[31] OZBAY E, SAHMARAN M, LACHEMI M, et al. Self-healing of microcracks in high-volume fly-ash-incorporated engineered cementitious composites[J]. ACI Mater J, 2013, 110(1): 33–43.

[32] SAHMARAN M, YILDIRIM G, ERDEM T K. Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials[J]. Cem Concr Compos, 2013, 35: 89–101.

[33] YILDIRIM G, LACHEMI M, OZBAY E, et al. Self-healing ability of cementitious composites: Effect of addition of pre-soaked expanded perlite[J]. Mag Concr Res, 2014, 66: 409–419.

[34] YILDIRIM G, SAHMARAN M, AHMED H U. Influence of hydrated lime addition on the self-healing capability of high-volume fly ash incorporated cementitious composites[J]. J Mater Civ Eng, 2014, 27(6): 04014187.

[35] TITTELBOOM K V, BELIE N D. Self-healing in cementitious materials-a review[J]. Materials, 2013, 6(6): 2182–2217.

[36] LI V C, EMILY H. Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure[J]. Adv Concr Technol, 2012, 10(6): 207–218.

[37] SCIVENNER K, QUZIA A, JUILLAND P, et al. Advances in understanding cement hydration mechanisms[J]. Cem Concr Res, 2019, 124: 1–16.

[38] WILLE K, NAAMAN A E, PARRA M G J. Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way[J]. ACI Mater J, 2011, 108(1): 46–54.

[39] KUNIEDA M, CHOONGHYUN K, UEDA N, et al. Recovery of protective performance of cracked ultra high performance-strain hardening cementitious composites (UHP-SHCC) due to autogenous healing[J]. J Adv Concr Technol, 2012, 10(9): 313–322.

[40] MCS-EPFL Lausanne. Recommendation: ultra-high performance fibre reinforced cement-based composites (UHFRC) construction material, dimensioning und application[C]. Zurich, Switzerland, 2016.

[41] PARK S H, KIM D J, RYU G S, et al. Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete[J]. Cem Concr Compos, 2012, 34(2): 172–184.

[42] WANG J Y, GUO J Y. Damage investigation of ultra high performance concrete under direct tensile test using acoustic emission techniques[J]. Cem Concr Compos, 2017, 88: 17–28.

[43] AHMARAN M, LI V C. Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash[J]. Cem Concr Res, 2009, 39(11): 1033–1043.

[44] AHMARAN M, LI V C. Influence of microcracking on water absorption and sorptivity of ECC[J]. Mater Struct, 2009, 42(5): 593–603.

[45] JACOBSEN S, MARCHAND J, HORNAIN H. SEM observations of the microstructure of frost deteriorated and self-healed concretes[J]. Cem Concr Res, 1995, 25(8): 1781–1790.

[46] ISMAIL M, TOUMI A, FRANCOIS R, et al. Effect of crack opening on local diffusion of chloride inert materials[J]. Cem Concr Compos, 2004, 34: 711–716.

[47] REINHARDT H W, JOOSS M. Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width[J]. Cem Concr Res, 2003, 33(7): 981–985.

[48] EDVARDSEN C. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete[J]. ACI Mater J, 1999, 96(4): 448–454.

[49] ALDEA C M, SONG W J, POPOVICS J S. Extent of healing of cracked normal strength concrete[J]. J Mater Civ Eng, 2000, 12(1): 92–96.

[50] CLEAR C A. The effects of autogenous healing upon the leakage of water through cracks in concrete[C]// Cement and Concrete Association Technical Report No. 559, Wexham Springs, 1985.

[51] REINHARDT H W, JONKERS H, VAN TITTELBOOM K, et al. Recovery against environmental action[C]// RILEM 11, Self-healing Phenomena in Cement-based Materials, Springer, 2013: 65–17.

[52] EDVARDSEN C. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete[J]. ACI Mater J, 1999, 96: 448–455.

[53] 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.

[54] KIM S, YOO D Y, KIM M J, et al. Self-healing capability of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete after exposure to cryogenic temperature[J]. Cem Concr Compos, 2019, 104: 103335.

[55] RAJCZAKOWSKA M, NILSSON L, HABERMEHL-CWIRZEN K, et al. Does a high amount of unhydrated portland cement ensure an effective autogenous self-healing of mortar[J]. Materials (Basel), 2019, 12(20): 3298.

[56] 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: 566–574.

[57] HUANG H, YE G, DAMIDOT D. Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste[J]. Cem Concr Res, 2013, 52: 71–81.

[58] GARCÍA CALVO J L, PÉREZ G, CARBALLOSA P, et al. Development of ultra-high performance concretes with self-healing micro/nano-additions[J]. Constr Build Mater, 2017, 138: 306–315.

[59] GUO J Y, 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, 204: 342–356.

[60] GRANGER S, LOUKILI A, PIJAUDIER-CABOT G, et al. Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis[J]. Cem Concr Res, 2007, 37(4): 519–527.

[61] 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.

[62] BEGLARIGALE A, VAHEDI H, EYICE D, et al. Novel test method for assessing bonding capacity of self-healing products in cementitious composites[J]. J Mater Civ Eng, 2019, 31(4): 1–12.

[63] 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]. J Adv Concr Technol, 2016, 14(12): 770–781.

[64] SAHMARAN M, LI V C. Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under highly alkaline environments[J]. Cem Concr Compos, 2008, 30(2): 72–81.

[65] 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 (in Chinese), 2016, 38(1): 40–45.

[66] WANG Y, AN M Z, YU Z R, et al. Impacts of various factors on the rehydration of cement-based materials with a low water-binder ratio using mathematical models[J]. Constr Build Mater, 2016, 125: 160–167.

[67] 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.

[68] SHI S. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results[J]. Cem Concr Res, 2004, 34(3): 537–545.

[69] MARCOTTE T D, HANSSON C M. Corrosion products that form on steel within cement paste[J]. Mater Struct, 2007, 40(3): 325–340.

[70] DIDIER S, KIM V T, STIJN S, et al. Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers[J]. J Intell Mater Syst Struct, 2014, 25(1): 13–24.

[71] HOSODA A, KOMATSU S, AHN T, et al. Self healing properties with various crack widths under continuous water leakage[C]// Concrete Repair, Rehabilitation & Retrofitting II, vol. 2, Taylor & Francis Group, 2009: 221–228.

[72] PANG B, ZHOU Z, HOU P, et al. Autogenous and engineered healing mechanisms of carbonated steel slag aggregate in concrete[J]. Constr Build Mater, 2016, 107: 191–202.

[73] AHN T H , KIM D J , KANG S H. Crack self-healing behavior of high performance fiber reinforced cement composites under various environmental conditions[C]// 13th ASCE Aerospace Division Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, and the 5th NASA/ASCE Workshop on Granular Materials in Space Exploration, 2012.

[74] GRANGER S, LOUKILI A. Mechanical behavior of self-healed ultra high performance concrete: from experimental evidence to modeling[C]// 3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, Vancouver, Canada, 2005.

[75] LIU B, ZHANG, J L, KE J L, et al. Trigger of self-healing process induced by EC encapsulated mineralization bacterium and healing efficiency in cement paste specimens[C]// 5th International Conference on Self-Healing Materials, Durham North Carolina's Bull City, 2015: 1–4.

[76] HUANG H, YE G. Self-healing of cracks in cement paste affected by additional Ca^{2+} ions in the healing agent[J]. J Intell Mater Syst Struct, 2014, 26(3): 309–320.

[77] ARIFFIN N F, HUSSIN M W, MOHD SAM A R, et al. Degree of hardening of epoxy-modified mortars without hardener in tropical climate curing regime[J]. Adv Mater Res, 2015, 1113: 28–35.

[78] RAHMAN A, SAM M, ARIFFIN N F, et al, Performance of epoxy resin as self-healing agent[J]. J Teknol, 2015(16): 9–13.

[79] XU J, YAO W. Multiscale mechanical quantification of self-healing concrete incorporating non-ureolytic bacteria-based healing agent[J]. Cem Concr Res, 2014, 64: 1–10.

[80] LI W T, JIANG Z W, YANG Z H. Acoustic characterization of damage and healing of microencapsulation-based self-healing cement matrices[J]. Cem Concr Compos, 2017, 84: 48–61.

[81] LI W T, JIANG Z W, YU Q Q. Multiple damaging and self-healing properties of cement paste incorporating microcapsules[J]. Constr Build Mater, 2020, 255: 119302.

[82] STUCKRATH C, SERPELL R, VALENZUELA L M, et al. Quantification of chemical and biological calcium carbonate precipitation: Performance of self-healing in reinforced mortar containing chemical admixtures[J]. Cem Concr Compos, 2014, 50: 10–15.

[83] FEITEIRA J, GRUYAERT E, DEBELIE N. Self-healing of dynamic concrete cracks using polymer precursors as encapsulated healing agents[C]// 5th International Conference on Concrete Repair, Belfast, Ireland, 2014: 65–69.

[84] WANG J Y, SNOECK D, VLIERBERGHE S V, et al. Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete[J]. Constr Build Mater, 2014, 68(68): 110–119.

[85] VIRGINIE W, JUNKER H M. Self-healing of cracks in bacterial concrete[C]// 2nd International Life Symposium on Service Life Design For Infrastructures, 2011: 825–831.

[86] LUO M, QIAN C X, LI R Y. Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete[J]. Constr Build Mater, 2015, 87(15): 1–7.

[87] KHALIQ W, EHSAN M B. Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques[J]. Constr Build Mater, 2016, 102(15): 349–357.

[88] PARKS J, EDWARDS M, VIKESLAND P, et al. Effects of bulk water chemistry on autogenous healing of concrete[J]. J Mater Civ Eng, 2010, 22(5): 515–524.

[89] YANG Y, YANG E H, LI V C. Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age[J]. Cem Concr Res, 2011, 41(2): 176–183.

[90] HUANG H, YE G, DAMIDOT D. Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials[J]. Cem Concr Res, 2014, 60: 68–82.

[91] TITTELBOOM K V, GRUYAERT E, RAHIER H, et al. Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation[J]. Constr Build Mater, 2012, 37: 349–359.

[92] PROUST A, MARLOT D, LENAIN J C. Application of acoustic emission to detect damage in concrete structures, illustrated with full scale examples, Concrete Solutions[C]// 1st International Conference on Concrete Repair, Saint Malo, France, 2003.

[93] LIU Y Z, AN M Z, WANG Y, et al. Rehydration model for ultra high-performance concrete matrix[J]. J Mater Civ Eng, 2021, 33(1):

04020415.

[94] JIANG J, ZHENG X, WU S, et al. Nondestructive experimental characterization and numerical simulation on self-healing and chloride ion transport in cracked ultra-high performance concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 198: 696–709.

[95] BENTZ D P. Guide to using CEMHYD3D: A three-dimensional cement hydration and microstructure development modelling package[M]. NIST Interagency Internal Report (NISTIR), 2017: 6485.

[96] HILLOULIN B, GRONDIN F, MATALLAH M, et al. Modelling of autogenous healing in ultra high performance concrete[J]. Cem Concr Res, 2014, 61/62: 64–70.

[97] FICHANT S, LA BORDERIE C, PIJAUDIER-CABOT G. Isotropic and anisotropic descriptions of damage in concrete structures[J]. Int J Numer Anal Methods Geomech, 2015, 4(4): 339–359.

[98] MATALLAH M, FARAH M, GRONDIN F, et al. Size-independent fracture energy of concrete at very early ages by inverse analysis[J]. Eng Fract Mech, 2013, 109: 1–16.

[99] KHELIDJ A, CHOINSKA M, CHATZIGEORGIOU G, et al. Coupling between progressive damage, temperature and permeability of concrete: experimental and numerical study[J]. Restor Build Monum, 2006, 12(4): 299–316.

[100] CHOINSKA M. Effets de la température, du chargement mécanique et de leurs interactions sur la perméabilité du béton de structure[D]. Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, 2006.

[101] PICANDET V, KHELIDJ A, BASTIAN G. Effect of axial compressive damage on gas permeability of ordinary and high-performance concrete[J]. Cem Concr Res, 2001, 31(11): 1525–1532.

[102] BERNARD O, ULM F J, LEMARCHAND E. Amultiscal emicromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials[J]. Cem Concr Res, 2003, 33(9): 1293–1309.

[103] GRONDIN F, BOUASKER M, MOUNANGA P, et al. Physico-chemical deformations of solidifying cementitious systems: multiscale modelling[J]. Mater Struct, 2010, 43(1/2): 151–165.