

微胶囊自修复混凝土修复效率对比分析研究综述

万 奕, 孙洪军

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年11月5日; 录用日期: 2025年11月26日; 发布日期: 2025年12月9日

摘 要

微胶囊自修复技术是一种能够提升混凝土结构耐久性和安全性的前沿方法, 从微胶囊囊芯和囊壳的构建材料、制备工艺以及修复机理这些方面入手, 着重对比分析了影响它修复效率的关键因素, 这些因素包含微胶囊参数、修复触发机制, 以及修复效果评估方法, 修复效率可以从强度恢复率、裂缝闭合度、渗透性恢复等多个不同的维度来衡量, 而且它受到微胶囊与混凝土基体相容性以及环境条件的影响非常显著。本文在综述现有研究结论的基础上, 增加批判性分析视角, 探讨不同研究测试方法差异对结果可比性的影响, 并基于现有研究提炼指导实践的设计原则与技术路线图, 为高性能自修复混凝土的设计与应用提供更具价值的理论参考。

关键词

微胶囊, 自修复混凝土, 修复效率, 修复机理, 对比分析

Research Review on Comparative Analysis of Microencapsulated Self-Repairing Concrete Repair Efficiency

Yi Wan, Hongjun Sun

School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: November 5, 2025; accepted: November 26, 2025; published: December 9, 2025

Abstract

Microcapsule self-repairing technology is a cutting-edge method to enhance the durability and safety of concrete structures. Starting from the construction materials of microcapsule core and

capsule shell, the preparation process, and the repair mechanism, we focus on comparing and analysing the key factors affecting the repair efficiency of the microcapsule, which include the parameters of the microcapsule, the repair triggering mechanism, and the method of evaluating the repair effect, which can be measured from the different dimensions, such as strength recovery, crack closure, and permeability recovery. The repair efficiency can be measured from the strength recovery rate, crack closure, permeability recovery and other different dimensions, and it is significantly affected by the compatibility of microcapsules with the concrete matrix and environmental conditions. This paper summarises the current challenges faced by this technology and provides an outlook on future research directions, with the aim of providing theoretical references for the design and application of high-performance self-repairing concrete. Building upon a review of existing research findings, this paper introduces a critical analytical perspective to examine how variations in testing methodologies affect the comparability of results. Drawing from current studies, it distils design principles and technical roadmaps to guide practical implementation, thereby providing more valuable theoretical reference for the design and application of high-performance self-healing concrete.

Keywords

Microcapsules, Self-Healing Concrete, Repair Efficiency, Repair Mechanism, Comparative Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

混凝土是最主要的建筑材料,在它服役的过程中,因为受到荷载以及环境因素的影响,产生裂缝是难以避免的事情,这些裂缝可是造成混凝土结构性能变差的主要原因,会严重影响到混凝土的耐久性以及使用寿命[1],每年,世界各个国家为了维护和修复混凝土出现的裂缝,都消耗了大量的资金[2],传统用来修复裂缝的方法,像表面涂层、灌浆以及开槽填充等,一般成本都非常高,工序也特别繁琐,而且这些都属于被动式、临时性的维护手段[3]。为了从根本上去应对这一挑战,自修复混凝土技术就应运而生了,微胶囊技术是把修复剂,例如环氧树脂、异氰酸酯等,提前封装在微米级的胶囊里面,然后把把这些胶囊掺入到混凝土基体当中,这就构成了一种创新的智能修复方案[4],当混凝土因为应力作用产生了微裂纹的时候,裂纹尖端的应力会让微胶囊破裂,这样就会释放出里面包裹的修复剂。修复剂会在毛细作用的影响下流入裂缝,并且凭借预先设计好的化学或者物理机制实现自动愈合损伤[5],这种机制有高效、耐久和环境可持续性的特点,被认为是一种非常有前景的技术方法,有希望显著延长混凝土结构的使用寿命,还可以降低维护成本[6]。

微胶囊自修复系统的性能核心是它的修复效率,也就是修复之后材料的力学性能、抗渗性能等关键指标恢复的程度。现有的研究表明,这个修复效率受到一个复杂系统的综合影响,主要有这些方面,微胶囊自身的特性,像囊芯材料的化学性质、囊壳的机械强度与触发灵敏度、微胶囊的尺寸以及它在基体中的掺量等[7];基体的性质,也就是微胶囊和水泥基材料的相容性,微胶囊的引入可能会对混凝土的初始力学性能和工作性产生影响[8];触发机制和修复条件,包括被动的机械破裂触发或者新兴的主动触发[9],以及修复环境的温度、湿度[10]等关键因素。湿养护条件已经被证实能够显著提升某些体系的修复效果,本文凭借对近年来的文献进行梳理和对比,重点分析不同微胶囊体系,主要包括环氧树脂、异氰酸酯、氰基丙烯酸酯以及基于膨胀矿物的无机胶囊等所实现的修复效率,围绕修复效率的评估方法、不同体系达到的最优效率值以及实现这些效率的关键参数来展开分析。

2. 微胶囊的构建与修复机理

2.1. 材料体系设计

囊芯材料作为自修复功能的核心载体, 其化学性质直接决定了修复机理与最终修复效能。根据化学特性的不同, 常用的囊芯材料主要可分为环氧树脂类、异氰酸酯类及其他功能性修复剂等类别。

2.1.1. 环氧树脂类

环氧树脂类修复剂因为它有优异的粘结性能, 以及已经发展得很成熟的固化体系, 到现在已经成为了目前研究范围最广泛的囊芯材料当中的一种, Li 等[7]采用了双喷嘴电喷雾-界面聚合法, 用创新的方法制备出了由环氧微胶囊和胺类微胶囊共同组成的双组分修复体系, 他们借助对微胶囊的比例、浓度以及粒径进行优化, 当添加的微胶囊质量分数为 10.0 wt%, 微胶囊的粒径处于 50~100 μm 这个范围, 并且环氧微胶囊和胺类微胶囊的质量比为 1:1 的时候, 实现了断裂韧性修复效率高达 100% 的效果。但其断裂韧性修复效率高达 100% 的结果是在高度优化的实验室条件下取得的, 实际工程中微胶囊的分散均匀性、基体相容性等因素可能显著影响其修复表现。Puhurcuoglu 等[11]通过动态 DSC 分析研究了环氧树脂的固化动力学参数, 为环氧树脂的固化机制提供了理论依据; Liu 等[12]则研究了活性酯固化环氧树脂的超高交联结构, 显著提升了其热稳定性和力学性能。Dong 等[8]中则是借助引入海藻酸钠来对脲醛树脂壳层进行改性处理, 成功制备出了一种复合微胶囊, 这种微胶囊是以环氧树脂作为囊芯, 以聚脲醛树脂/海藻酸钠复合物作为囊壁, 这种制备方法有效地提高了微胶囊的完整性, 还把微胶囊的囊芯含量提升到了 $80.57 \pm 2.4 \text{ wt}\%$, 基于这种微胶囊制备出来的自修复混凝土, 在微胶囊的含量为 12 wt%, 修复龄期达到 45 天的时候, 表现出了非常卓越的自主修复能力, 它的抗压强度恢复率高达 $157.32\% \pm 5.60\%$ 。这一结果虽令人瞩目, 但其长期耐久性与在实际结构中的稳定性仍有待验证。

2.1.2. 异氰酸酯类

异氰酸酯类修复剂依靠它较高的反应活性, 在自修复材料这个领域呈现出非常十分突出的优势, 这类材料能够和环境里的水分快速的发生反应, 进而生成聚脲, 这样就可以对裂缝进行有效的填充, Song 等[10]所开发出来的聚脲-MMT/HDI 微胶囊在水泥砂浆当中有着十分出色的表现, 经由 28 天的湿养护之后, 其强度恢复率达到了 117.38%。不过, 该研究未系统比较不同养护制度对修复效率的影响, 缺乏对干湿循环等实际环境条件的模拟。Han 等[13]把用 PE 蜡包裹起来的 HDI 微胶囊运用到地质聚合物当中, 当掺量为 1% 的时候, 让抗压强度保留率提高了 36.6%, 裂缝修复率达到了 64.2%, 凭借微观分析能够发现, HDI 和基体发生反应所形成的纤维状网络结构是实现高效修复的关键所在, 除此之外, Kothari 等[14]和 Wu 等[15]的研究证明了异氰酸酯微胶囊在环氧涂层当中有修复能力以及多功能潜力。

2.1.3. 其他修复剂

除上述两类主要修复剂外, 研究人员还开发了多种功能性囊芯材料。De Nardi 等[16]通过改性开发出储存期延长的 N-CA 体系, 为血管网络自修复系统提供了新的选择。硅酸钠类修复剂在油井水泥中展现出良好的应用前景, 能够实现裂缝深度减少 58% 和吸水性系数降低 76% 的修复效果[17]。此外, Hou 等[18]开发了一种基于双功能肽的生物仿生二氧化硅微胶囊, 其在温和条件下制备, 具有良好的稳定性和可控释放性能, 为智能响应型修复体系提供了新思路, 但其在实际混凝土高碱环境中的稳定性仍是未来研究的重点。Khorasani 等[19]则成功将椰子油基醇酸树脂封装于聚(三聚氰胺-脲-甲醛)壳中, 拓展了可再生修复剂的应用潜力。

2.2. 囊壳材料

囊壳材料在微胶囊自修复系统当中, 起到保护囊芯以及控制触发释放的功能, 像聚脲甲醛和聚脲这

类聚合物壳层,有良好的综合性能, Kothari 等[14]制备的 PUF/HDI 微胶囊,有极好的热稳定性,分解起始温度能够达到 155℃~195℃,复合壳层可以凭借对材料进行改性,提升性能。Song 等[10]中,在聚脲壳里面加入了蒙脱土,这样提高了力学强度。无机壳层如氧化镁胶囊[20]则表现出优异的耐碱侵蚀性,适用于混凝土的高碱环境。不同壳层材料的选择需要综合考虑其在混凝土中的存活率与触发灵敏度之间的平衡[21]。现有研究对囊壳材料的长期稳定性研究不足,混凝土服役环境中的碱侵蚀、干湿循环等因素可能导致囊壳性能退化,影响修复剂的储存与释放,此外,部分研究在评估囊壳性能时,仅关注机械强度和触发灵敏度,忽略了囊壳在混凝土搅拌过程中的分散性,而分散不均可能导致局部修复效率不足。

2.3. 修复机理

微胶囊自修复的机理主要有化学修复和物理修复这两种模式,化学修复依靠的是修复剂在裂缝界面产生化学反应从而形成粘结,就像环氧树脂和固化剂发生的交联反应,以及异氰酸酯和水分接触之后聚合生成聚脲,物理修复是凭借修复剂的物理特性来实现裂缝封闭的,例如超吸水聚合物遇到水会膨胀进而封堵裂缝[20],或者油性修复剂利用疏水作用来阻隔水分[22]在实际的修复过程当中,这两种机制大多时候会协同发挥作用,修复材料能够凭借化学键合来实现牢固的粘结,还可以凭借物理填充来改善密封的效果[23],环境条件对修复机理的实施效果有着非常显著的影响,研究显示湿养护条件能够明显地促进异氰酸酯等体系的修复反应,这样就能提高整体的修复效率[10],不同修复机理的选择需要根据具体的工程环境以及性能要求来进行优化设计。

3. 修复效率的关键影响因素对比分析

修复效率的评估是一个有多个维度的体系,这个体系主要囊括了力学性能恢复率、裂缝宽度闭合度、渗透性恢复率以及微观结构愈合程度等指标[6],有研究表明,微胶囊参数和触发机制是影响修复效率的两个最为核心的因素。

3.1. 微胶囊参数的影响

微胶囊的尺寸与浓度对于修复效果有着决定性的影响。Li 等[7]发现,尺寸在 50~100 μm 的微胶囊,在浓度为 10.0 wt%的情况下,可以实现最优的修复效果,不同的研究中最优尺寸存在差异,这可能与裂缝宽度分布、基体刚度、测试方法等因素有关,提示我们在设计微胶囊时需结合具体工程裂缝特征进行尺寸匹配。如果微胶囊的尺寸过小,就会导致修复剂的包裹量不足;而要是尺寸过大,就会对基体的初始性能产生不利的影响,在裂缝处也难以有效地破裂。在浓度方面则存在着一个最佳的范围,Dong 等[8]发现,当微胶囊的掺量提高到 12%的时候,抗压强度恢复率可以达到 157.32%,Song 等[10]的研究表明,当微胶囊的掺量为 4%时,能够使砂浆强度恢复率达到 117.38%。然而,要是微胶囊的掺量过高,往往就会对材料的初始力学性能产生负面的影响,Pandey 等[24]在环氧复合材料的研究中发现,当微胶囊含量超过 1.0 wt%之后,材料的疲劳寿命就开始下降,Bakir 等[22]在沥青混合料的研究中也观察到了类似的现象,也就是胶囊含量的变多会导致疲劳寿命降低。其参数对环境的影响见表 1。

Table 1. Influence of microencapsulation parameters and environmental conditions on remediation effects
表 1. 微胶囊参数及环境条件对修复效果的影响

影响因素	类别/范围	对混凝土初始性能的影响	对自修复效果的影响	参考文献
微胶囊浓度	低浓度 (0.5~1.0 wt%)	对力学性能负面影响较小	修复效果初步显现,但可能不充分	[24]
	最佳浓度 (3.0~4.0 wt%)	可能轻微降低抗拉强度	修复效率达到峰值	[10] [15]

续表

微胶囊尺寸	高浓度 (12.0wt%)	可能显著降低初始力学性能	可能实现极高的强度恢复， 但需权衡利弊	[8]
	小尺寸 (20~50 μm)	在基体中分散性好	包裹修复剂量少，可能修复 能力有限	[7] [21]
	中等尺寸 (50~200 μm)	对基体性能影响可控	与常见微裂缝尺度匹配，修 复效率高	[7] [10]
	大尺寸(>300 μm)	可能成为应力缺陷，劣化初 始性能	修复剂总量大，但触发需要 更大裂缝	[15]
环境条件	干养护	无额外影响	修复反应受限，效率较低	[10] [20]
	湿养护/水分	无额外影响	为许多化学反应提供必要条 件，效率显著提升	[10] [13]
	提升温度	无额外影响	加速修复反应速率，提高修 复度	[22]

壳芯结构的设计同样是非常关键的，囊壳需要在混凝土搅拌的过程中保持完整，在裂缝扩展的时候能够及时地破裂，Yunnan Institute 等[17]借助对比两种聚脲壳微胶囊，最终选择了那种对水泥强度负面影响较小的刚性壳层微胶囊，用于后续的研究，此外，高囊芯含量是实现高效修复的一个前提条件，Dong 等[8]和 Wei 等[15]制备的微胶囊，其囊芯含量分别达到了 80.57%和 66.5%，这为它们优异的修复效果奠定了十分坚实的基础。

3.2. 触发机制与修复条件

触发机制是影响修复效率的关键因素，裂缝产生所导致的机械破裂是最为主要的被动触发方式[9]，研究人员开发出了多种主动触发机制，例如 Li 等[25]制备的含石墨微胶囊，这种微胶囊可以在微波照射的情况下破裂，从而实现了特定位置裂缝的“按需”修复，环境条件对修复效果有着显著的影响。Urdl 等[26]则研究了基于 Diels-Alder 反应的三聚氰胺 - 甲醛树脂自修复涂层，展示了热触发下的高效自愈合性能。水分是许多化学修复剂发生反应的关键因素，Song 等[10]明确地发现，在湿养护条件下的修复效果远优于干养护条件，温度也是一个关键的影响因素，Bakir 等[22]的研究证实，提高养护温度并且延长养护时间，能够有效地提升沥青的修复率，这些研究结果为优化修复条件提供了非常关键的依据。

4. 修复效率评估方法综述

微胶囊自修复混凝土的修复效率评估需要建立起一个多层次的综合体系，张立卿等[6]在研究当中指出，完整的评估应该结合力学性能测试、耐久性评价、裂缝观测以及微观分析等多种不同的手段。

4.1. 宏观层面

强度恢复率是最为直接且有效的指标，Song 等[10]凭借对比修复之前和修复之后试件的力学性能，证实了以聚脲 - 蒙脱土作为复合壳层，以六亚甲基二异氰酸酯作为囊芯的自修复微胶囊能够让砂浆强度恢复率达到 117.38%；Dong 等[8]的研究表明，以环氧树脂作为修复剂，以聚脲甲醛 - 海藻酸钠复合物作为壳层的自修复微胶囊体系能够实现 157.32%的抗压强度恢复率。耐久性评估主要关注的是渗透性能的恢复情况，Li 等[20]凭借水渗透性测试发现，添加了无机胶囊的试件渗透性得到了显著的改善。这些结果均是基于不同的试件尺寸、加载方式与养护条件，其可比性存在局限。未来研究应推动建立统一的测试标准，如规定试件裂缝宽度、修复环境、评价周期等，以增强数据之间的可比性与工程指导价值。

4.2. 微观观测与模拟分析

裂缝形态学研究采用了先进的观测技术, Zhou 等[23]运用数字图像相关(DIC)技术精确地记录了混凝土劈裂过程中裂缝的发展规律。微观结构分析能够深入地揭示修复机理, 扫描电镜和能谱分析被广泛地应用于观察修复产物的形貌和成分, Han 等[27]开发的 3D 微力学模型能够预测微胶囊自修复混凝土的力学行为, 凭借参数化研究阐明了微观参数对材料性能的影响规律。这些评估方法相互之间进行补充, 共同构成了一个完整的修复效率评价体系。其各类技术应用价值见表 2。

Table 2. Microcharacterisation techniques and their applications
表 2. 微观表征技术及其应用

表征技术	分析内容	应用价值	参考文献
DIC 技术	裂缝发展规律	定量观测裂缝扩展过程	[23]
SEM 分析	微观形貌观察	分析修复产物形貌和界面结合	[8]
EDS 分析	成分分析	确定修复产物化学组成	[20]

4.3. 数值模拟方法

数值模拟是研究微胶囊自修复材料微观力学行为的一种关键工具, 它为解决微胶囊参数对自修复混凝土力学性能影响评估方法匮乏这一问题, 提供了一条有效的途径, Han 等[27]在相关研究中建立了有创新性的三维微力学模型, 借助弹性割线柔度张量, 分析微胶囊自修复混凝土在拉伸荷载作用下的微观力学响应情况, 从而实现对材料力学行为的准确描述。这个模型有完整预测材料应力-应变关系的能力, 阐明了微观参数对自修复混凝土力学行为所产生的影响规律, 为微胶囊自修复混凝土的材料设计以及性能优化奠定了非常坚实的理论基础。Rengaraju 等[28]通过全生命周期评估(LCA)分析了微胶囊自修复混凝土的环境影响, 强调了其在长期使用中减少钢材用量和维护需求的可持续性优势。

下面将对微胶囊自修复混凝土修复效果评估方法进行总结, 见表 3。

Table 3. Summary of methods for assessing the repair effectiveness of microencapsulated self-repairing concrete
表 3. 微胶囊自修复混凝土修复效果评估方法总结

评估维度	核心方法与指标	主要应用价值	参考文献
力学性能	强度恢复率	定量表征承载能力的恢复程度, 直观有效	[8] [10] [15]
	疲劳寿命恢复	评估修复后材料在循环荷载下的耐久性	[22] [24]
	断裂韧性恢复	评价材料阻止裂缝扩展能力的恢复情况	[5] [29]
耐久性能	水/气渗透性测试	评价裂缝密封效果及抗渗性能的恢复	[17] [20]
	氯离子渗透系数	评估修复后钢筋抗腐蚀能力的间接指标	[6]
裂缝形态	光学显微镜/DIC 技术	定量测量裂缝宽度、长度的变化, 可视化修复过程	[20] [23]
	超声/声发射技术	无损检测内部裂缝的愈合情况	[6]
微观机理	扫描电镜(SEM)/能谱(EDS)	观察修复产物形貌、成分及与基体的结合界面	[13] [20] [23]
	傅里叶变换红外光谱(FTIR)	分析裂缝处化学基团变化, 确认修复反应发生	[30]
理论模拟	热重分析(TGA)	评估微胶囊热稳定性及修复产物含量	[8] [14]
	3D 微力学模型	预测材料宏观力学行为, 分析微观参数影响	[27]
	分子动力学模拟	从分子层面模拟修复剂与基体的相互作用	[30]
可持续性	全生命周期评估(LCA)	从环境影响角度评估技术的可持续性	[28]

5. 总结与展望

通过对微胶囊自修复混凝土深入研究发现, 优化微胶囊参数(尺寸、浓度、壳芯结构)和环境条件, 可

获得显著的修复效果, 其中最优条件下的强度恢复率可达 157.32%。不同修复体系(环氧树脂、异氰酸酯等)各具特色, 复合壳层设计可有效提升微胶囊的综合性能。修复效率的评估需要结合宏观力学性能、微观结构分析等多维度方法, 建立完整的评价体系。

尽管该技术已取得重要进展, 但在实际应用中仍面临三大挑战:

(1) 在技术层面, 需要平衡微胶囊的存活率与触发灵敏度, 确保修复剂在混凝土高碱环境中的长期稳定性。

(2) 在可持续性方面, 虽然自修复混凝土的隐含碳较高, 但其全生命周期内可减少近 60%的钢材用量和 25%的修补维护需求, 凸显了全生命周期分析的重要性。Lv 等[31]研究了基于环氧树脂的自修复系统, 指出其在强度恢复方面仍有提升空间; 陈自敏等[32]则通过多目标优化方法提升了改性环氧树脂的综合力学性能, 为修复剂配方设计提供了参考。

(3) 在标准化方面, 修复效率评估方法尚未统一, 大规模生产和工程应用仍是亟待突破的瓶颈。

基于现有研究的批判性分析, 提出以下设计原则与技术路线, 为技术优化与工程应用提供指导:

1) 设计原则

(1) 协同优化原则: 微胶囊参数需与修复剂类型、囊壳材料及基体特性协同优化, 同时兼顾混凝土初始力学性能与修复效率, 建议微胶囊掺量控制在 3%~12%范围内, 尺寸选择 50~200 μm 以匹配常见微裂缝尺度。

(2) 环境适配原则: 根据工程环境选择修复体系与触发机制, 潮湿环境优先选用异氰酸酯类修复剂, 极端环境可考虑主动触发机制(如微波触发), 确保修复机理在目标环境中有效发挥作用。

(3) 性能均衡原则: 囊壳材料需平衡保护性能、触发灵敏度与分散性, 优先选择复合壳层, 囊芯含量不低于 65%以保证修复剂供给, 同时控制囊壳厚度避免影响基体初始性能。

2) 技术路线

(1) 材料设计阶段: 开发复合壳层(如有机-无机杂化)以提升存活率与触发灵敏度;

(2) 触发机制创新: 探索 pH、温度、电磁等多场耦合触发机制, 实现按需修复;

(3) 评估体系构建: 建立涵盖宏观-微观-模拟-可持续性的多维度评价标准;

(4) 工程验证与标准化: 开展中试与实地工程验证, 推动相关规范的制定。

此外, 尽管微胶囊自修复混凝土在实验室中展现出卓越的修复潜力, 其从实验室走向工程应用仍面临标准化缺失、长期性能数据不足、成本较高等挑战。未来应加强跨学科合作, 结合人工智能、材料基因工程等前沿技术, 加速高性能微胶囊体系的开发与产业化进程。

参考文献

- [1] Liu, B., Wu, M., Du, W., Jiang, L., Li, H., Wang, L., *et al.* (2023) The Application of Self-Healing Microcapsule Technology in the Field of Cement-Based Materials: A Review and Prospect. *Polymers*, **15**, Article No. 2718. <https://doi.org/10.3390/polym15122718>
- [2] 黄佳涛, 廖蔚彬, 吴沛宗, 等. 微胶囊技术在自愈混凝土中的研究进展[J]. 混凝土, 2024(12): 229-235.
- [3] Jiang, L., Wu, M., Du, F., Chen, D., Xiao, L., Chen, W., *et al.* (2024) State-of-the-Art Review of Microcapsule Self-Repairing Concrete: Principles, Applications, Test Methods, Prospects. *Polymers*, **16**, Article No. 3165. <https://doi.org/10.3390/polym1623165>
- [4] 房国豪, 陈锦妹, 王琰帅, 等. 微胶囊自修复混凝土研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(9): 2423-2432.
- [5] Lee, Y.B., Suslick, B.A., de Jong, D., Wilson, G.O., Moore, J.S., Sottos, N.R., *et al.* (2023) A Self-Healing System for Polydicyclopentadiene Thermosets. *Advanced Materials*, **36**, Article ID: 2309662. <https://doi.org/10.1002/adma.202309662>
- [6] 张立卿, 边明强, 王云洋, 等. 自修复混凝土修复性能评估中的若干关键技术与方法研究综述[J]. 材料导报,

- 2024, 38(9): 78-100.
- [7] Li, Z., Du, G., Yang, S., Lu, X., Zheng, F., Hao, B., *et al.* (2025) Self-Healing Imidazole-Cured Epoxy Using Microencapsulated Epoxy-Amine Chemistry. *Polymers*, **17**, Article No. 2391. <https://doi.org/10.3390/polym17172391>
 - [8] Puhurcuoğlu, N. and Arman, Y. (2024) Parameter Estimation of Epoxy Resin Cure Kinetics by Dynamics DSC Data. *Polymers for Advanced Technologies*, **35**, e6498. <https://doi.org/10.1002/pat.6498>
 - [9] Liu, J., Cui, X., Qin, J., Shi, M., Wang, D., Yang, L., *et al.* (2024) Ultra-High Cross-Linked Active Ester-Cured Epoxy Resins: Side Group Cross-Linking for Performance Enhancement. *Polymer*, **301**, Article ID: 127063. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127063>
 - [10] Dong, S., Li, X., Li, Z., Zhu, Y. and Li, H. (2025) Robust Poly(Urea-Formaldehyde)/Sodium Alginate Microcapsules for Achieving Efficient Self-Healing in Concrete. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **717**, Article ID: 136760. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.136760>
 - [11] 吕乐阳, 张翔宇, 董必钦, 等. 自修复混凝土触发机制设计方法综述[J]. 材料导报, 2024, 38(20): 149-160.
 - [12] Song, Z., Zhang, S., Wang, J., Huang, Z., Jiang, L., Guo, M., *et al.* (2025) Preparation and Self-Healing Properties of Polyurea-MMT/HDI Microcapsules for Cement-Based Materials. *Journal of Building Engineering*, **107**, Article ID: 112791. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112791>
 - [13] Han, Y., Dai, W., Ju, Y., Wang, D., Liu, M., Zhou, L., *et al.* (2025) The Synthesis of Hexamethylene Diisocyanate Microcapsules and Mechanisms of Self-Healing Geopolymer through an Isocyanate-Hydroxy System. *Case Studies in Construction Materials*, **22**, e04581. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04581>
 - [14] Kothari, J. and Iroh, J.O. (2023) Self-Healing Poly(Urea Formaldehyde) Microcapsules: Synthesis and Characterization. *Polymers*, **15**, Article No. 1668. <https://doi.org/10.3390/polym15071668>
 - [15] Du, W., Yu, J., Gu, Y., Li, Y., Han, X. and Liu, Q. (2019) Preparation and Application of Microcapsules Containing Toluene-Di-Isocyanate for Self-Healing of Concrete. *Construction and Building Materials*, **202**, 762-769. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.007>
 - [16] De Nardi, C., Gardner, D., Cazzador, G., Cristofori, D., Ronchin, L., Vavasori, A., *et al.* (2021) Experimental Investigation of a Novel Formulation of a Cyanoacrylate-Based Adhesive for Self-Healing Concrete Technologies. *Frontiers in Built Environment*, **7**, Article ID: 660562. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.660562>
 - [17] Mao, W., Litina, C. and Al-Tabbaa, A. (2020) Development and Application of Novel Sodium Silicate Microcapsule-Based Self-Healing Oil Well Cement. *Materials*, **13**, Article No. 456. <https://doi.org/10.3390/ma13020456>
 - [18] Hou, F., Guo, Z., Hui, Y. and Zhao, C. (2025) Biomimetic Fabrication of Silica Microcapsules Using Bifunctional Peptides. *Advanced Materials Interfaces*, **12**, e00221. <https://doi.org/10.1002/admi.202500221>
 - [19] Khorasani, S.N., Ataei, S. and Neisiany, R.E. (2017) Microencapsulation of a Coconut Oil-Based Alkyd Resin into Poly(Melamine-Urea-Formaldehyde) as Shell for Self-Healing Purposes. *Progress in Organic Coatings*, **111**, 99-106. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.05.014>
 - [20] Li, J., Guan, X. and Zhang, C. (2023) Inorganic Capsule Based on Expansive Mineral for Self-Healing Concrete. *Cement and Concrete Composites*, **144**, Article ID: 105305. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105305>
 - [21] 赵尚传, 李小鹏, 王少鹏. 混凝土自修复微胶囊壁材的研究现状与进展[J]. 材料导报, 2020, 34(S2): 1201-1205.
 - [22] Esma, B., Erkut, Y., Mehmet, Y., *et al.* (2023) Effect of Using Capsules with Waste Mineral Oil on Self-Healing of Long-Term Aged Hot-Mix Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **35**, 103648. <https://doi.org/10.1061/jmcee7.mteng-15369>
 - [23] 周小燕, 杨淘, 代薇, 等. 基于 DIC 技术的修复后混凝土裂缝扩展特性试验研究[J]. 水电能源科学, 2025, 43(7): 119-122+68.
 - [24] Pandey, A., Sharma, A.K., Shukla, D.K. and Pandey, K.N. (2023) Effect of Self-Healing by Dicyclopentadiene Microcapsules on Tensile and Fatigue Properties of Epoxy Composites. *Materials*, **16**, Article No. 5191. <https://doi.org/10.3390/ma16145191>
 - [25] Li, Y., Yu, J., Cao, Z., He, P., Liu, Q., Han, X., *et al.* (2021) Preparation and Application of Novel Microcapsules Ruptured by Microwave for Self-Healing Concrete. *Construction and Building Materials*, **304**, Article ID: 124616. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124616>
 - [26] Urdl, K., Weiss, S., Christöfl, P., Kandelbauer, A., Müller, U. and Kern, W. (2020) Diels-Alder Modified Self-Healing Melamine Resin. *European Polymer Journal*, **127**, Article ID: 109601. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109601>
 - [27] Han, K., Ju, J.W., Chen, X., Lv, L., Zhou, S., Wei, G., *et al.* (2024) A 3D Micromechanical Model to Predict the Complete Stress-Strain Relation of Microencapsulated Self-Healing Concrete. *International Journal of Damage Mechanics*, **34**, 3-25. <https://doi.org/10.1177/10567895241245956>
 - [28] Rengaraju, S., Arena, N., Kanavaris, F., Jędrzejewska, A. and Al-Tabbaa, A. (2025) Environmental Life Cycle

-
- Assessment of Self-Healing Concrete with Microcapsules and Impregnated Lightweight Aggregates. *Journal of Building Engineering*, **111**, Article ID: 113105. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113105>
- [29] Kim, J.R. and Netravali, A.N. (2017) Self-Healing Starch-Based “Green” Thermoset Resin. *Polymer*, **117**, 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.04.026>
- [30] Jiang, W., Zhou, G., Wang, C., Xue, Y. and Niu, C. (2021) Synthesis and Self-Healing Properties of Composite Microcapsule Based on Sodium Alginate/Melamine-Phenol-Formaldehyde Resin. *Construction and Building Materials*, **271**, Article ID: 121541. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121541>
- [31] Lv, J., Niu, S., Zhang, W. and Sun, Y. (2025) Study on Self-Healing Effect of Concrete Based on Epoxy Resin Adhesive. *Materials*, **18**, Article No. 2679. <https://doi.org/10.3390/ma18122679>
- [32] 陈自敏, 冉志红, 张艳, 等. 混凝土裂缝修复用改性环氧树脂的多目标优化[J]. 材料导报, 2025, 39(10): 252-260.