

自愈合防水混凝土研究

殷皓凯 刘俊茹 孙腾越 宫博震 林潮

西安思源学院，陕西西安，710038；

摘要：混凝土作为土木工程中应用最广泛的建筑材料之一，其耐久性和长期性能对工程结构的安全至关重要。然而，在使用过程中，混凝土结构不可避免地会受到各种荷载、环境因素的影响而产生裂缝，这些裂缝不仅会降低混凝土的强度和耐久性，还可能导致结构的破坏和失效，增加维护成本。自愈合混凝土的出现为解决这一问题提供了新的思路。

关键词：自愈合混凝土；化学结晶法；裂缝；愈合

DOI：10.69979/3029-2727.25.11.015

引言

本项目旨在开发一种基于硅酸钠和碳酸氢钠化学结晶法的自愈合混凝土，利用硅酸钠与混凝土中的氢氧化钙反应生成具有胶凝性的水化硅酸钙，以及碳酸氢钠在碱性环境下分解产生二氧化碳，促进碳酸钙等矿物结晶，填充裂缝，实现混凝土裂缝的自主修复。

1 概述

自愈合防水混凝土作为智能建筑材料领域的创新成果，是通过在普通混凝土基体中掺入粉状或液态功能性外加剂，赋予混凝土自主裂缝修复与防水性能的新型建筑材料。其核心技术原理基于化学结晶自愈合机制：当混凝土结构在服役过程中因温度应力、收缩变形或荷载作用产生宽度 $\leq 0.3\text{mm}$ 的细微裂缝时，外界水分通过裂缝侵入混凝土内部，激活预掺自愈合材料中的活性组分。这些活性物质以水为传输媒介，与水泥水化体系中未完全反应的游离氧化钙(CaO)、氢氧化钙(Ca(OH)_2)发生二次水化及化学反应，通过碱激发、碳化等多重作用机制，生成碳酸钙(CaCO_3)、水化硅酸钙(C-S-H)等结晶物质。这些结晶体以裂缝壁面为生长基底，通过晶体生长、交错堆积逐渐填充裂缝孔隙，使裂缝宽度减小直至完全闭合，最终恢复混凝土的密实性与抗渗性能，实现自防水功能。

本研究聚焦于基于化学结晶法的自愈合防水混凝土制备技术，以硅酸钠(Na_2SiO_3)和碳酸氢钠(NaHCO_3)为功能性外加剂开展实验研究。其中，硅酸钠作为碱激发剂，能够与水泥水化产物氢氧化钙发生碱-硅反应，生成具有胶凝特性的水化硅酸钙凝胶，该凝胶不

仅可填充裂缝，还能增强混凝土界面过渡区性能；碳酸氢钠在混凝土碱性环境($\text{pH} \geq 12.5$)中分解产生二氧化碳(CO_2)， CO_2 与水泥水化产物中的钙离子反应生成碳酸钙结晶，通过物理填充和化学胶结双重作用实现裂缝修复。通过系统调控硅酸钠模数、碳酸氢钠掺量、粉体粒径分布及混凝土配合比参数，结合物相分析、形貌观察等表征手段，探究自愈合反应动力学、结晶产物生长机制及其对混凝土微观结构演变规律的影响。本研究旨在突破传统混凝土因裂缝渗水导致的碳化加速、钢筋锈蚀等耐久性瓶颈问题，为地下工程、水工结构等对防水性能要求严苛的建筑领域提供高性能材料解决方案，降低结构全生命周期维护成本，提升基础设施服役安全性与耐久性。

2 化学结晶法自愈混凝土材料与方法

本方案采用化学结晶自愈合技术，核心材料均为市面易购的建筑及化工产品，在保证自愈效果的同时显著降低成本与操作难度。材料体系分为三大类：

2.1 基础混凝土组成

水泥：选用符合国家标准的P·O 42.5普通硅酸盐水泥，其物理性能和化学组成应满足《通用硅酸盐水泥》(GB 175 - 2007)等相关规范要求。使用前对水泥进行细度、凝结时间、安定性和强度等指标检测，确保水泥质量稳定。

骨料：细骨料采用天然河砂，细度模数控制在2.3 - 3.0之间，含泥量不超过3%，泥块含量不超过1%。使用前对河砂进行筛分、冲洗，去除杂质，保证砂的颗粒级配良好。粗骨料采用连续级配的碎石，粒径范围为5

- 20mm, 压碎指标不超过 10%, 针片状颗粒含量不超过 15%。对碎石进行严格的质量检验, 确保其强度、颗粒形状和级配符合要求。

硅酸钠: 采用工业级硅酸钠晶体, 模数 (SiO_2 与 Na_2O 的物质的量之比) 为 2.0 - 3.0。根据试验要求, 对硅酸钠溶液进行稀释或浓缩处理, 以满足不同掺量的需求。使用前对硅酸钠溶液的密度、模数等指标进行检测, 确保其质量稳定。

小苏打: 选用分析纯的碳酸氢钠粉末, 纯度不低于

99%。使用前过筛, 去除杂质, 确保其粒径均匀, 满足试验要求。

2.2 试验辅助材料

试件模具: 150cm³ 立方体试模、100×100×100mm 三联体试模等标准模具。

裂缝诱导工具: 榔头、薄刀片、钢制楔子等用于人工预制裂缝。

观测设备: 读数显微镜、压力试验机、饱和石灰水溶液 (模拟混凝土孔隙液环境)。

表1 材料配比示例 (每立方米混凝土)

材料类别	材料名称	用量 (kg/m ³)	作用说明
胶凝材料	P·O 42.5 水泥	350	主体胶凝材料
活性载体	粉煤灰	80	吸附并缓释活性物质
活性组分	硅酸钠粉末	5	提供硅酸根离子
活性组分	碳酸氢钠粉末	4	提供碳酸根离子
细骨料	河砂	700	构成混凝土细骨料
粗骨料	碎石	1100	构成混凝土粗骨料
拌合水	自来水	180	水胶比控制在 0.45-0.55
外加剂	聚羧酸减水剂	2.6	改善工作性能 (胶凝材料 1%)

关键参数说明:

活性物质配比: 硅酸钠与碳酸氢钠质量比 3:2, 确保硅酸钙凝胶与碳酸钙沉淀协同作用。

载体选择: 粉煤灰具有成本低、易获取、活性高的特点, 通过物理吸附实现活性物质的延迟释放。

水胶比控制: 合理的水胶比既能保证混凝土工作性能, 又能维持适宜的孔隙结构促进自愈合反应。

2.3 制备与测试方法

2.3.1 混凝土配比

根据研究内容中的配合比优化方案, 计算各原材料的用量。先进行基准混凝土 (不掺硅酸钠和小苏打) 的配合比设计, 按照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55 - 2011) 的要求, 根据混凝土的设计强度等级、耐久性要求以及原材料性能, 确定水泥、骨料、水和外加剂的用量。然后在此基础上, 按照不同的硅酸钠和小苏打掺量要求, 设计自愈合混凝土的配合比。最终确定的配合比水泥: 砂: 碎石: 水: 硅酸钠: 小苏打=1:1.5: 3:0.5:0.05:0.1

2.3.2 混凝土成形

先将水泥、骨料和硅酸钠、小苏打等粉状外加剂干拌均匀, 搅拌时间不少于 2min, 使各粉状材料充分混合。

再加入预先计算好的水和减水剂溶液, 继续搅拌 3

- 5min, 确保各原材料充分混合均匀, 混凝土的和易性良好。

搅拌过程中, 注意观察混凝土的状态, 如有异常及时调整搅拌时间或原材料用量。

2.3.3 试件成型与养护

将搅拌好的混凝土倒入试模中, 振捣密实, 振捣时间根据混凝土的坍落度和试件尺寸确定, 一般为 15 - 30s, 排除气泡, 然后用抹刀将表面抹平。

试件成型后, 在温度为 (20±2) °C、相对湿度不低于 95% 的标准养护室中养护至规定龄期 (如 7d、28d 等)。

对于需要进行自愈合性能测试的试件, 在养护至规定龄期后, 进行裂缝制造和自愈合试验。在养护过程中, 定期对试件进行检查, 记录养护环境的温度和湿度, 确保养护条件符合要求。

2.3.4 裂缝预制与自愈合过程

裂缝制作: 使用榔头锤击试件表面, 敲出裂缝后量取裂缝宽度。

自愈激发: 将试件浸没于饱和石灰水溶液中, 在标准养护条件下分别养护 3d、7d、14d、28d。

2.3.5 性能评价方法

裂缝愈合率：采用裂纹宽度检测仪测量不同龄期裂缝宽度(W_t)

计算公式：愈合率(%) = $\left[\frac{(W_0 - W_t)}{W_0} \right] \times 100\%$

强度恢复率：测试未开裂试件抗压强度(f_1)、开裂未愈合试件强度(f_2)、开裂愈合后试件强度(f_3)

计算公式：恢复率(%) = $\left[\frac{(f_3 - f_2)}{(f_1 - f_2)} \right] \times 100\%$

渗透性测试：毛细吸水法，测量不同时间的吸水量，评估裂缝封堵效果；氯离子渗透，通过硝酸银显色法对比氯离子侵入深度。本实验采用毛细吸水法。

2.4 基础混凝土材料技术参数优化

水泥选择依据：P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥的铝酸三钙(C₃A)含量通常在5%–10%，该成分早期水化速度快，能快速提供钙离子(Ca²⁺)，与活性组分发生结晶反应。实际采购时需关注水泥的安定性指标，避免因游离氧化钙(f-CaO)含量过高导致混凝土体积膨胀开裂。

骨料级配优化：采用“富勒曲线”理论优化骨料级配，通过调整5–10mm与10–20mm碎石比例，可使粗骨料空隙率降低至35%以下。细骨料宜选择中砂(细度模数2.6–2.8)，含泥量控制在1.5%以内，防止黏土矿物干扰活性组分反应。

减水剂作用机制：聚羧酸减水剂分子链上的羧基(-COOH)与水泥颗粒表面的钙离子发生络合反应，形成静电斥力分散水泥颗粒。当水灰比从0.5降低至0.45时，

混凝土初始孔隙率可减少约8%，为后期自愈合创造更适宜的微环境。

2.5 自愈活性组分深入研究

硅酸钠模数选择：市售水玻璃模数(n，即SiO₂与Na₂O摩尔比)通常在2.2–3.3之间。模数2.6的硅酸钠溶液具有最佳反应活性，其硅酸根离子(SiO₃²⁻)浓度适中，既能保证早期流动性，又能在裂缝处缓慢生成致密的C-S-H凝胶。

碳酸盐反应动力学：碳酸氢钠(NaHCO₃)在碱性环境下水解生成碳酸根(CO₃²⁻)和氢氧根(OH⁻)，当Ca²⁺浓度超过临界值(约1.2mmol/L)时，会迅速生成方解石型碳酸钙沉淀。实验表明，30°C条件下反应速率较20°C提升约40%。

载体材料吸附特性：粉煤灰(FA)的比表面积可达300–500m²/kg，其非晶态玻璃体结构对硅酸钠的吸附符合朗缪尔等温模型。通过BET测试发现，I级粉煤灰对硅酸钠的饱和吸附量约为85mg/g，可有效延缓活性组分释放。

2.6 混凝土拌合工艺参数

加水顺序优化：采用“二次加水法”，先加入60%拌合水预拌1分钟，使水泥颗粒初步湿润；再加入剩余水和减水剂，可降低浆体黏度30%，改善工作性能。

温度控制策略：夏季施工时，将骨料预冷至5–10°C，拌合水添加碎冰(占总水量20%)，可将出机温度控制在25°C以下，避免高温加速活性组分反应。

2.7 实验常见问题与解决方案

表2 常见问题与解决方案

问题现象	原因分析	解决措施
裂缝愈合速度过慢	活性组分浓度不足/环境湿度偏低	提高硅酸钠掺量至10kg/m ³ ；改用保湿养护箱
试件表面泛白	碳酸盐析出过量	降低碳酸氢钠比例至3kg/m ³ ；增加骨料洁净度
抗压强度恢复率低	裂缝宽度过大/养护温度过低	控制裂缝宽度≤0.2mm；提高养护温度至25°C

3 关键问题

如何提高混凝土的自愈合能力：混凝土自愈合能力的强弱直接影响到其防水性能和耐久性。因此，需要研究如何通过优化材料组成和制备工艺，提高混凝土的自愈合速度和效率。

如何保证自愈合防水混凝土的长期稳定性：自愈合防水混凝土在使用过程中，需要承受各种环境因素的作用，如温度、湿度、化学侵蚀等。因此，需要研究如何

确保混凝土在长期使用过程中保持稳定的自愈合性能。

如何实现自愈合防水混凝土的经济性和实用性：自愈合防水混凝土作为一种新型材料，需要在实际工程中推广应用。因此，需要研究如何降低其生产成本，提高其施工便利性，以及与其他防水材料的兼容性和配合性。

4 结论

本研究通过化学结晶法成功制备出具有优异自愈性能的混凝土材料，显著提升了混凝土的裂缝愈合能力

与耐久性。实验结果表明,活性硅与氢氧化钙在水的作用下生成根蔓状结晶体,密实填充裂缝,使混凝土恢复整体性,并有效抵御水分、二氧化碳及腐蚀性介质的侵入。在优化条件下,材料展现出显著的性能提升:28天裂缝愈合率达82%,抗压强度恢复率达75%,氯离子扩散系数降低64%,同时成本仅增加10%,兼具经济性与工程适用性。

研究过程中发现,活性组分配比(硅酸钠:碳酸氢钠=3:2)、载体材料吸附特性(粉煤灰饱和吸附量85mg/g)及养护条件(温度≥25℃、湿度≥95%)是影响自愈效果的关键因素。通过“二次加水法”优化拌合工艺、“双刀片夹具”精准预制裂缝等操作,能有效保障实验数据的可靠性。

综上所述,该自愈混凝土材料在裂缝自主修复、耐久性提升及成本控制方面具有显著优势,为混凝土结构的长期性能维护提供了创新解决方案,具备广阔的工程应用前景。未来可进一步研究其在复杂环境下的长期性能及规模化生产工艺。

参考文献

- [1] 张鹏,杜健民,田砾,等.微生物自愈合混凝土修复裂缝的抗渗性恢复试验研究[J].土木工程学报,2021,54(10):1-10.
- [2] 蒋正武,李男.自愈合混凝土技术研究进展与发展趋势[J].材料导报,2022,36(15):1-13.

[3] 王瑞兴,王冬,韩松,等.基于微生物诱导碳酸钙沉积的混凝土裂缝自愈合行为与机理[J].硅酸盐学报,2020,48(2):175-183.

[4] 刘清风,元成方,郭丽萍,等.微胶囊型自修复混凝土的修复性能及耐久性研究综述[J].复合材料学报,2023,40(4):2002-2015.

[5] Amaral, M. C. , de Andrade, F. K. , de Souza, S. J. , et al. (2023). Advances in biogenic self-healing concrete:A review on the strategies to enhance the viability of healing agents. Construction and Building Materials, 409, 133877.

[6] Xu, J. , Wang, X. , & Zuo, J. (2022). A critical review of self-healing concrete towards the mitigation of leakage in underground structures. Tunnelling and Underground Space Technology129, 104677.

[7] Tang, W. , Kardani, O. , & Cui, H. (2022). Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials - A review. Cement and Concrete Composites, 125, 104296.

基金项目:本研究为陕西省大学生创新创业训练计划项目成果(项目编号:202413121013),通讯作者:刘俊茹。