

# 混凝土裂缝修补中仿生自愈合技术的应用前景

陈宇<sup>通讯作者</sup> 张瑜硕 姚古聪 王伟涛 汤栎昊

新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐, 830052;

**摘要:** 混凝土作为现代建筑领域的关键材料, 其耐久性对工程结构的安全性与经济性起着决定性作用。然而, 裂缝问题长期困扰着混凝土结构, 传统修补方法存在诸多局限性。仿生自愈合技术作为一种创新的解决方案, 通过模拟生物体的自愈机制, 为混凝土裂缝的修复带来了新的希望。本文全面阐述了仿生自愈合技术的基本原理、具体实现方式及优势, 旨在深入探讨该技术在混凝土裂缝修补中的应用前景, 为推动其在建筑行业的广泛应用提供参考。

**关键词:** 仿生自愈合技术; 混凝土裂缝修补; 微生物自愈合; 可持续性

**DOI:** 10.69979/3029-2727.24.11.035

## 1 引言

### 1.1 混凝土在现代建筑中的重要性

由于混凝土具有卓越的强度、高度的可塑性和持久的耐用性, 它已经变成了现代建筑领域中最常用的建筑材料之一。不论是高楼大厦、桥梁、隧道, 还是工业建筑和水利设备, 混凝土在所有建筑领域都发挥着至关重要的作用, 在建筑行业中, 它的广泛应用为人类社会的向前发展和进步提供了坚实的物质支持<sup>[1]</sup>。

### 1.2 混凝土裂缝问题的严重性

尽管混凝土具有许多显着优点, 但是不同混凝土结构依然面临着裂缝问题。裂缝的出现不仅会对混凝土结构的外观质量造成负面影响, 更重要的是, 它会促使水分和各种具有腐蚀性的物质(如氯离子、硫酸根离子等)渗透进来, 由此进一步加快钢筋腐蚀, 混凝土劣化过程。时间一长, 前面提到的问题很可能逐渐减弱它的承重能力、降低它的安全性与耐用性、甚至危及工程结构的寿命与正常功能。

### 1.3 传统修补方法的局限性

为解决混凝土产生裂痕的难题, 几种常规修复方法如灌注环氧树脂或者采用碳纤维布加固等被普遍采用。但上述建议实施过程中会产生一系列固有问题如费用过高、建设流程繁杂、修复成果难以为继。使用以环氧树脂为主的注入工艺, 该工艺对专业施工工具及技术团队依赖程度较高, 故施工工艺颇为繁杂。环氧树脂因其内在有毒性质导致固化阶段难以分解和降解, 会对环境

造成严重污染。

此外, 长期使用循环中环氧树脂还可能面临着老化和开裂等诸多问题, 上述因素均会对环氧树脂修复能力产生负面效果; 尽管用碳纤维布做加固手段可以增强结构承重性能, 但是它对密封裂缝的效果却差强人意, 这样就会相应提高造价, 传统建筑修复方法难以适应现代建筑中混凝土结构持久性与连续性要求。

### 1.4 仿生自愈合技术的提出

近年来, 仿生自愈合技术因生物体自我修复机制的影响, 逐步成为混凝土裂缝修复研究领域的焦点。针对现有的几种代表性混凝土材料, 例如钢筋混凝土梁、砌体结构墙体和水泥基复合材料, 提出一种新的基于生物矿化原理的混凝土智能修补技术。

这项技术模仿了生物(例如人体的皮肤和植物组织)的自我修复机制, 使得混凝土在出现裂缝时能够自动激活修复机制, 从而为解决混凝土裂缝问题提供了一种具有创新性的解决方案和方法。

本研究全方位地回顾了仿生自愈合技术的最新进展, 以及它对混凝土材料属性的影响, 同时也对当前面临的核心问题和未来的发展方向进行了深入探讨。仿生自愈合技术与传统的修复技术相比, 展现出了如持续性、成本效益、高效率和对环境的友好性等多个明显的优点, 在未来有着广阔的应用潜力。

## 2 仿生自愈合技术的基本原理

### 2.1 生物体自愈机制的启示

生物体受到伤害后通常具有自我恢复的能力, 这种

自适应行为，是人体抵抗各种环境变化的一种重要保障。以一实际病例为例，人的皮肤在损伤后会发生一系列错综复杂的生理改变，其中有但不限于血液凝固和炎性反应等、细胞数量增多及组织结构重塑最终实现了创面自然愈合；尽管植物组织可能遭受外部伤害，但它仍然具备利用其内部生理调控机制来推动细胞分裂和分化的能力，从而有效地修复受损的部分，这些生物实体自我修复机制对仿生自愈合的发展提供了有意义的导向。

## 2.2 内源自愈合原理

内源自愈合技术作为仿生自愈合方法中的一个关键环节，其效果主要依赖于混凝土材料中各种成分在裂缝形成后的修复能力。在众多技术中，微胶囊技术被视为内源性愈合的经典例子。微胶囊是一种特殊的材料，它将修复剂（如环氧树脂和聚氨酯）包裹在微小的胶囊内。当混凝土结构出现裂痕时，这些微胶囊会受到损害，释放其内部的修复剂来填补这些裂痕，并与周围的混凝土基体发生反应，从而实现裂缝的修复<sup>[2]</sup>。此外，矿物添加剂也可以作为内源性的愈合成分。某些矿物，例如硅灰和偏高岭土，在接触水后会经历水化作用，形成碳酸钙等沉淀，这些沉淀有助于填补裂缝，从而增强混凝土的紧密度和持久性。

## 2.3 外源自愈合原理

其由外而内逐渐痊愈，在外界刺激下混凝土修复机制被启动，湿度，温度，化学构成等外界刺激元素频繁出现。以微生物自我修复技术为例，其代表着外部修复的标准方法。在这种技术的应用过程中，通过向混凝土中加入某些特定的微生物（如巴氏芽孢杆菌等），当混凝土结构出现裂痕并与水和氧发生接触时，这些微生物利用周围营养物质代谢产生碳酸钙等沉淀物来有效封堵裂缝。此外，电化学沉积技术这一外来修复手段通过在混凝土结构中施加电场使裂缝区域产生钙、硅酸根等离子沉积进而产生沉淀物从而达到高效修复裂缝目的。

# 3 仿生自愈合技术的具体实现方式

## 3.1 微胶囊技术

微胶囊技术是仿生自愈合方法之一，核心思想为修复剂植入微胶囊中均匀地分布于混凝土基底中。当混凝土结构中存在裂痕时，其进一步延伸可能引发微胶囊断裂，而微胶囊释放其内部修复剂将其充填，引发固化过程以实现裂缝修复。制造微胶囊的工艺可分为两大类型：

一是以物理原理为主的工艺，如喷雾干燥，相分离等；另一种是化学合成的方法，例如沉淀聚合法。二是用化学手段如界面聚合技术、原位聚合技术，不同制备技术微胶囊内粒子尺寸，壁厚，囊芯含量等均存在差异，进一步影响修复效果<sup>[3]</sup>。尽管微胶囊技术应用于混凝土裂缝修复方面已取得一些进展，但是仍存在着胶囊分布不均匀，制备成本较高以及与混凝土基体相容性较差等系列急需解决的问题。

## 3.2 矿物材料自愈合

矿物材料的自我修复机制是通过在特定的环境条件下进行矿物材料的水合反应或其他化学变化，从而达到修复裂缝的目的。当前的研究显示自然界有多种天然矿物可用于混凝土裂缝的修复，常用矿石成分为硅灰，偏高岭土和矿渣等。这些矿物材料可以用作水泥土的无机填料，该类矿物材料表现了明显的生物活性。与水泥水化生成物接触后产生碳酸钙和水化硅酸钙等化学沉淀。这些化学物质帮助充填裂缝以增加混凝土紧密性与持久性。另外，可将其用作添加剂以改善水泥石力学性能、增强抗渗性能和降低脆性。矿物材料自愈合技术虽然经济有效且环境友好，但是在修复中效果却不尽人意，一般仅用于微小裂缝修复任务中。

## 3.3 微生物自愈合

微生物自愈合技术作为一种仿生自愈合技术，有着广泛的应用前景。这一技术是将特定微生物导入混凝土，并利用其代谢活动生成碳酸钙和其他沉淀物以堵塞裂缝。常用微生物有巴氏芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌。微生物自愈合技术在环保和可持续方面的优势使得细菌的存活率和稳定性以及对环境的适应性方面出现了问题。如微生物生长代谢需有合适的温度，湿度及营养物质，不同环境条件都可能影响其活性及修复效果。

## 3.4 离子渗透技术

离子渗透技术通过对混凝土结构施加电场或者利用自然离子的扩散作用使钙和硅酸根等离子沉积于裂缝部位形成沉淀物来达到修复裂缝目的。该技术显著优点之一就是既能修补又能不破坏混凝土结构，修补效果颇佳。但离子渗透技术存在着一些内在问题，如修复周期要求长、能源消耗大等。

# 4 仿生自愈合技术的优势

#### 4.1 可持续性

仿生自愈合技术有一个最重要的优点，那就是它的可持续性。传统混凝土修补方法一般需人工定期维护与修补，不但费用昂贵，还会对周围环境产生一定影响。但仿生自愈合技术可以让混凝土结构裂缝出现时自动引发修复功能并进行长期自主修复，降低人工干预及维护成本，增加混凝土结构使用寿命及可持续性。

#### 4.2 经济性

在全生命周期成本视角下仿生自愈合技术经济效益显着，尽管早期采用仿生自愈合方法会带来材料成本的增加，但因其有利于降低后续养护与修复成本而在远期可明显降低混凝土结构总成本。一些大型基础设施项目通过仿生自愈合可缩短裂缝修复造成停工时长以降低维护成本和增加工程经济回报。

#### 4.3 高效性

仿生自愈合技术的特点是能快速修复裂缝产生之初，以避免其继续扩展。这种技术是在缺陷处用材料充填，使之产生新的微裂纹而逐步闭合起来，最后使整条裂缝处于完全闭合状态来降低应力集中程度。该方法比传统修复技术修复速度快，可快速恢复混凝土结构完整性和持久性。以仿生自愈合技术为基础的钢筋锈蚀防护工程进行了简述。举例来说，在某些需要承受动态荷载的建筑结构中（如桥梁、工业厂房等），裂缝的迅速扩张可能会引发结构的突发性破坏。但是仿生自愈合技术可以在裂缝产生的一瞬间即时修复裂缝，显著增强上述结构的安全可靠性。

#### 4.4 环保性

仿生自愈合技术通常使用微生物、矿物材料等环保无害的修复材料，对环境的影响相对较小。相较于传统的化学修复材料（例如环氧树脂），这类材料在其生产和应用阶段不会释放出大量污染物，完全满足了可持续发展的标准。以微生物的自我修复技术为背景，使用的微生物能够通过周围环境的物质代谢来生成碳酸钙和其他的沉积物，这些沉积物都是天然的，并且对环境非常友好。

### 5 仿生自愈合技术的应用现状

#### 5.1 桥梁工程

桥梁施工期间，混凝土结构经常承受动态荷载，环

境侵蚀等诸多因素作用，使其较易出现裂痕。桥梁工程应用中仿生自愈合技术常采用微胶囊或者微生物修复动态荷载作用下出现的裂痕以增强桥梁持久性。例如，在桥梁的关键组成部分（如梁体、桥墩等），研究人员已经采用了微胶囊技术。当桥梁结构出现裂痕时，微胶囊可以释放出修复材料以弥补裂缝，继而提高桥梁承载及持久性。有鉴于此，微生物自愈合这一技术已在许多桥梁建设项目当中得到了切实采纳与运用。通过将微生物添加到混凝土结构当中，利用其代谢过程对裂缝进行闭合，该技术能够有效减少桥梁维护成本及维修频率。

#### 5.2 地下工程

地下的建筑项目，如隧道和地下室，常常处于湿润的条件下，这使得混凝土结构容易受到地下水的侵蚀和渗透，从而可能导致裂缝的产生。要提高地下工程持久性就必须改善混凝土。地下建设项目矿物自我修复技术已显示出巨大潜在的应用前景。目前，多数对矿物材料研究主要集中在其防水功能上，对矿物自我修复特性和工作原理研究比较缺乏。混凝土结构开裂或者与地下水接触后，掺入的矿物材料发生水化反应产生碳酸钙等各种沉淀物<sup>[4]</sup>。这些材料帮助填充裂缝并且能够有效地抵御高湿环境的冲刷。矿物自愈合技术因其无需依靠外界能源与设备，具有成本低，环境友好，施工方便等优点。基于部分隧道建设项目，采用矿物自我修复技术能够显着提升隧道衬砌防渗耐用性，进而显着降低隧道渗漏等相关问题风险。

#### 5.3 海洋工程

海洋工程中的混凝土结构面临着氯离子侵蚀、海浪冲击等恶劣环境条件的检验，裂缝问题尤其突出。微生物自愈合技术在海洋工程中具有独特的优势。微生物可利用海水中营养物质的代谢活动，产生碳酸钙等沉淀物，封堵裂缝，有效应对氯离子，海浪等冲击。例如，将微生物自愈合技术运用于一些海洋平台和港口码头等工程，可以显著提高混凝土结构抵抗氯离子侵蚀的性能和耐久性，延长混凝土结构的使用寿命。

#### 5.4 大型建筑

大型建筑项目采用自修复材料可以显著增强建筑结构稳定性与可靠性。如高层建筑，工业厂房等各类工程项目，仿生自愈合技术的应用可显著降低因温度波动与收缩引起的混凝土结构裂缝，由此进一步提升了此类

建筑结构安全性与持久性<sup>[5]</sup>。尽管仿生自愈合技术应用于大型建筑领域还处于试验阶段，但是，随着科学技术的进步与发展，该技术已显示出极大的潜在应用价值。

### 5.5 试验性工程案例

目前仿生自愈合技术还多限于试验性工程项目应用，以荷兰某隧道工程为例，利用细菌自愈混凝土技术成功将巴氏芽孢杆菌作为微生物导入隧道衬砌结构。监测一段时间后发现，隧道内部裂缝已得到有效修补，修补效果十分显著。但由于该技术尚不符合标准化工艺及施工标准，故尚未被推广应用。

## 6 结论

仿生自愈合技术模仿了自然修复的机制，为解决混凝土中的裂缝问题提供了一种革命性的方法。它在持续性、经济效益和环境友好性上都展现出了明显的优势，因此具有广大的应用潜力。虽然当前这项技术正面临技术成熟度不足、成本受限、环境适应性不均和长期性能数据缺乏等多重挑战，但随着材料科学、生物技术、纳

米技术和人工智能的不断进步，有望逐步突破上述的困境。在未来，仿生自愈合技术有望崭露头角，成为混凝土工程修复的主导技术，推动建筑业向更加智能化和可持续的方向发展。

### 参考文献

- [1] 胡嘉铭. 建筑大体积混凝土结构裂缝的形成原因与预防研究[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(07): 73-75.
- [2] 程文镇. 自修复混凝土技术在房屋建筑工程中的应用[J]. 砖瓦, 2024, (09): 137-139.
- [3] 程龙. 基于氢键的有机硅自修复材料的制备及性能研究[D]. 山东大学, 2019.
- [4] 季亮. 建筑工程施工中混凝土结构的裂缝防治措施[J]. 工程建设, 2024, 56(06): 39-43+86.
- [5] 李勇, 张涛. 大跨度双曲连拱渡槽施工方法及技术决策[J]. 水利建设与管理, 2013, 33(10): 1-4+26.

基金项目：新疆农业大学 2024 年度大学生创新训练计划项目 (dxscx2024242)