

复杂环境下工程结构损伤演化规律及应对策略研究

刘克敏

武汉科技大学城市建设学院, 湖北武汉, 430065;

摘要: 本文围绕复杂环境中工程结构的损伤演化问题, 探讨仿生自愈合技术的原理与应对策略。工程结构在服役中面临裂缝、腐蚀等多种损伤, 传统修复方法依赖人工且效率低、成本高。仿生自愈合技术借鉴生物自愈机制, 分为内源自愈合(如材料分子链重组、形状记忆效应)与外源自愈合(如植入修复剂微胶囊、微生物矿化)两条路径, 通过微胶囊、矿物材料、微生物代谢、离子渗透等具体技术实现损伤自动修复。该技术无需人工干预即可在损伤初期响应, 精准作用于受损部位, 兼具高效性、经济性与环保性, 可延长结构使用寿命并降低资源消耗。尽管存在大尺度损伤修复能力不足、环境适应性局限及标准体系缺失等挑战, 但其在桥梁、海洋工程等领域的应用已展现出提升结构稳定性与安全性的潜力, 为工程修复提供了创新思路。

关键词: 工程结构; 损伤演化; 仿生自愈合; 修复技术

DOI: 10.64216/3080-1508.25.02.038

引言

1.1 工程结构在现代建设中的重要性

工程结构承担现代建设的核心支撑任务, 承载人类社会发展的物质基础, 城市高楼、跨海大桥、地下隧道以及海洋平台依赖工程结构保持稳定耐久, 稳定性直接影响国民经济发展并护卫人民生命财产, 城市化进程不断加速促使工程结构不断提升功能, 应对气候变化、极端天气和地质灾害等日益严峻的环境挑战。

1.2 工程结构损伤问题的严重性

工程结构在服役期间遭遇多种损伤, 结构在服役过程中经历损伤并致使效能降低, 损伤引起严重后果, 统计数据显示全球每年因结构损伤而发生事故, 引发经济损失达数千亿美元, 事故伴随重大人员伤亡, 各类损伤通常包括裂缝、腐蚀、疲劳、磨损及冲击。

1.3 传统修复方法的局限性

传统工程结构损伤修复方法依赖人工检测提供基础并实施局部修补与整体更换, 修复方式在缓解结构损伤上发挥一定作用但同时暴露出明显局限, 传统修复依托人工干预消耗大量人力物力并面临检测盲区与主观判断误差, 针对大型复杂结构或难以到达部位检测手段难以全面展开致使部分损伤未能被及时发现, 损伤扩展到一定程度后才启动干预导致操作延误并迅速推高修复费用。

1.4 仿生自愈合技术的提出

仿生自愈合技术参考生物体修复伤害的原理设

计, 旨在促使工程结构自动修补受损部位, 该技术源自对自然界中人体皮肤缝合、骨骼断裂重建以及树木闭合破损树皮现象的认真观察与研究, 科学家们深入探查生物自愈过程, 揭示出该过程需先识别损伤, 再运输修复物质, 最后对受损部位实施修复, 为工程结构自愈技术研发指明方向, 仿生自愈合技术将修复功能嵌入材料或结构内, 在外部刺激或内部触发下迅速感知损伤, 自动启动修补程序, 从而减少或避免人工干预, 展现出及时响应、持续运作和高经济效益等显著优势, 与传统被动修复方法相比, 性能更为突出。

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

生物体展现自愈机制促使工程结构开发自愈合技术, 自然界中各种生物历经亿万年进化培育出高效且可靠的自我修复系统, 该系统整合了检测损伤的器件、储运修复材料的单元及执行修复任务的模块, 检测器件精准捕捉损伤信号, 储运单元迅速调配所需修复材料, 执行单元实时启动修复动作, 生物修复过程依据实际损伤情况灵活调节资源分配和修复强度, 为提升工程结构自愈效能提供了宝贵启示。

2.2 内源自愈合原理

内源自愈合依托几种基本机制, 材料展现流动性恢复, 某些聚合物在受热或光照作用下重新流动并填充裂缝, 超分子材料通过氢键、离子键等非共价键实现可逆断裂后迅速重组以重建分子间作用, 含有动态共价键的材料在特定条件下促使化学键可逆断裂后

及时重构,形状记忆材料借助相变在温度变化时恢复原始形态。

内源自愈合技术依托精心设计的材料组分,同时调节服役环境参数以促使自愈合过程在适宜条件下启动和推进,工程师精确配比各类材料组分,专家细致调整服役环境条件以实现优化,技术在修复能力受限及环境要求严格的考验下,在特定应用场景中依靠简单且可靠的方法展现独特优势。

2.3 外源自愈合原理

外源自愈合指提前在工程材料或结构中植入修复剂,损伤出现时触发释放修复剂以修补受损部位,外源自愈合与内源自愈合存在区别,外源自愈合系统需专门策划修复剂的储存、释放及触发机制。外源自愈合系统由修复剂、载体系统及触发机制三部分构成,系统中的修复剂承担损伤修复的关键作用,修复剂既可独立应用,又可组合使用。载体系统执行储存并保护修复剂的任务,阻止修复剂在使用过程中提前释放或失效,常采用微胶囊、中空纤维或血管网络,触发机制保证在适时刻激活修复剂并发挥效能,可通过物理破坏、化学反应、pH变化或温度变化引起修复剂释放。

3 仿生自愈合技术的具体实现方式

3.1 微胶囊技术

微胶囊技术在仿生自愈合领域起步较早,显示出成熟发展趋势,研究者将修复剂封入微米级胶囊中,材料或结构一旦受损时,胶囊便迅速破裂,修复剂即时逸出,裂缝同步被填充,聚合或其他化学反应促使修复得以实现。

典型的微胶囊自愈合系统由壳材、核材和催化剂三部分构成,壳材通常采用聚脲甲醚、聚苯乙烯、聚乳酸等高分子材料,壳材既在制备与使用时提供足够的机械强度以保护内部物质,又能在受损时轻易断裂,核材承担修复剂的作用,常见的修复剂有环氧树脂、二氰酸酯和不饱和聚酯,这些修复剂必须具备良好的流动性和反应活性,催化剂均匀分散在基体中,催化剂促使修复剂释放后迅速固化。

3.2 矿物材料自愈合

矿物材料自愈合技术主要针对水泥基材料展开

研究,技术利用矿物在特定条件下迅速结晶或沉淀,矿物随即充填裂缝并促进材料结构重构以修复和恢复整体性能,技术形式分为两种,第一种依托材料中残存未水化的水泥颗粒继续水化生成水化产物以充填裂缝,这种方式称为内源自愈合,第二种则在材料中加入特定矿物添加剂如膨胀剂、地质聚合物和硅酸盐材料,触及水或其他介质后发生反应生成用于充填裂缝的物质。

3.3 微生物自愈合

微生物自愈合技术利用微生物代谢产生矿物沉淀填充裂隙,技术获得生物混凝土或活体混凝土的称号,方法挑选特定菌株作为支撑,例如芽孢杆菌属细菌能在恶劣环境中长时间存活,条件合适时激发生成碳酸钙等矿物质沉淀作用。

微生物自愈合系统包含微生物、营养源和保护载体三大组成部分,微生物处于系统核心位置发挥矿化作用适应环境变化并保障安全,营养源为系统提供能量和碳源通常选用尿素和钙乳酸盐,保护载体承担防御职责阻挡混凝土高碱环境和机械应力损害微生物常见的保护载体包括膨润土、多孔陶粒和水凝胶。

3.4 离子渗透技术

离子渗透技术依据电化学原理工作,技术主要修复混凝土及金属结构的损伤,该技术利用电场激发离子移动,离子经过迁移在损伤区域沉积或参与化学反应,技术最终促成修复产物生成并补强受损处。

混凝土结构中常用技术包含电化学氯离子脱除、电化学再碱化和电化学沉积,当混凝土构件出现裂缝或钢筋受腐蚀时,工程人员在结构表面设立临时阳极,直流电场推动碳酸根和硅酸根等负离子向内部迁移,裂缝处生成碳酸钙或硅酸钙等沉淀,同时驱使氯离子及其他有害物向外扩散,实现修复和防护的双重效果。

在金属结构中,离子渗透技术用于修补因腐蚀产生的损伤,离子渗透技术采用电化学过程在损伤部位沉积保护性金属层或转化膜,该技术在沉积过程中修复金属表面并强化防腐性能,离子渗透技术展现出精准掌控修复流程的特点,离子渗透技术针对特定缺损定向施修,生成的修复产物与基体材料紧密结合,实现持久稳定的修复效果。

表 1: 仿生自愈合技术的主要类型及特点对比

技术类型	基本原理	主要材料/组成	适用场景	优势	局限性
------	------	---------	------	----	-----

技术类型	基本原理	主要材料/组成	适用场景	优势	局限性
微胶囊技术	修复剂封入微米级胶囊，损伤时胶囊破裂释放修复剂	壳材：聚脲甲醛、聚苯乙烯等 核材：环氧树脂、二氰酸酯等 催化剂	聚合物基材料、复合材料	成熟度高，修复速度快	修复能力有限，一次性使用
矿物材料自愈合	利用矿物结晶或沉淀充填裂缝	未水化水泥颗粒、膨胀剂、地质聚合物、硅酸盐材料	水泥基材料、混凝土结构	与基材相容性好，修复效果持久	需要水分参与，修复速度较慢
微生物自愈合	微生物代谢产生矿物沉淀填充裂隙	微生物（如芽孢杆菌）、营养源（尿素、钙乳酸盐）、保护载体（膨润土、多孔陶粒）	混凝土结构、地下工程	环保性高，具有捕碳功能	环境要求高，修复时间长
离子渗透技术	利用电场激发离子移动，在损伤区域沉积	电极系统、电解质溶液、离子源	混凝土结构、金属结构	修复精准，可同时实现防护	需外部能源，设备复杂

4 仿生自愈合技术的优势

4.1 可持续性

仿生自愈合技术展现明显优势，这种技术提高材料利用效率，降低资源消耗，缓解对环境的负担，自愈合材料修复工程早期与中期的损伤，延长结构使用寿命，减少更换频率，降低大修次数，实现节约原材料及减少废弃物的目标，相关估计显示，自愈合技术将混凝土结构服役年限延长 30%~50%，此延长表明在相同服务期内混凝土生产量可减近一半。

自愈合技术大幅降低传统修复过程中的能源消耗与碳排放，传统修复要求拆除、运输、处理和重建等多个环节，每个环节都需要消耗大量能源并产生碳排放，自愈合技术依托结构自身的自动修复功能，有效绕过了这些繁琐流程。

4.2 经济性

仿生自愈合技术致力于压缩全生命周期成本，展示出经济优势，初始阶段自愈合材料成本偏高，超越传统材料，长期运行中自愈合机制逐步启动，降低费用，技术演示出显著经济效益。

自愈合技术降低常规维护频率，减弱修复强度，节省人工支出，降低设备成本，缩减材料消耗，延长结构使用寿命，推动结构持续稳定，推迟大修和更换进程，削减年化固定资产支出，大型基础设施如桥梁、隧道、海洋平台借助延展使用期限实现经济效益积累，效益表现尤为显著。

4.3 高效性

仿生自愈合技术展现出快速感知损伤、即时修复和高效利用能源等特点，其在损伤响应、修复完整性和能源利用方面均表现突出，与传统修复方式相比，

该技术在损伤初期便自主检测并启动修复，立即激活修复程序，缩短了等待人工检测与干预的时间，有效压缩了损伤发生到修复完成之间的时差，这种及时响应有效阻止了微小损伤向严重缺陷扩散，杜绝了牵一发而动全身的连锁反应。

自愈合技术瞄准损伤部位展开精准修复，直接把修复材料送到缺陷区域以实现修补，从而达到节省资源的效果，在微观尺度损伤修复场景中该技术展现出明显胜过传统方法的精准修复表现。

自愈合过程通过环境因素或结构内部储存的能量触发修复反应，展现能源利用高效性，某些自愈合系统在遭遇损伤时释放能量激活修复机制，实现能源循环再利用。

4.4 环保性

自愈合技术延长工程构件使用周期，降低更新频率，减少维修需求，直接截减建筑废弃物的产生，建筑废弃物作为构成城市固体废弃物的重要来源，占用大量土地进行处理与填埋，由此引发环境污染，自愈合技术延长结构使用寿命，显著缓解环境负担，部分自愈合技术展现环境修复作用，微生物自愈合体系中所采用的细菌修补裂缝，吸收环境中的二氧化碳，并转化为碳酸钙以实现捕碳功能，特定自愈合涂层分解空气中的氮氧化物与挥发性有机化合物，改善周边环境质量。

自愈合技术选用生物相容性强、毒性低的材料，利用生物基聚合物、天然矿物质和环保催化剂降低有害物质的使用与释放，自愈合过程在常温常压下运作，展现低能耗、少污染特性，符合绿色化学原则。

表 2：仿生自愈合技术与传统修复方法的对比

对比维度	仿生自愈合技术	传统修复方法

对比维度	仿生自愈合技术	传统修复方法
修复启动时机	损伤初期自动启动	人工检测后手动干预
修复响应速度	快速（损伤发生后立即响应）	缓慢（需等待检测与维修安排）
修复精准度	微观尺度精准修复	宏观尺度，可能存在过度修复
人力资源需求	低（自动化程度高）	高（需专业人员检测与修复）
维护成本	初期投入高，长期成本低	初期投入低，长期成本高
环境影响	低（减少废弃物，部分具有环境修复功能）	高（产生建筑废弃物，消耗更多资源）
结构寿命影响	延长 30%~50%	有限延长
适用范围	微小损伤，难以到达的部位	各类损伤，但难以处理隐蔽部位

5 结论

5.1 研究成果总结

仿生自愈合技术瞄准复杂环境中工程结构受损问题产生修复效能，在实践中显现出卓越成效，基础理论研究中专家详细探讨生物自愈合机制，将这一机制转化为工程材料与结构自我修复的原理，构建出依托内源自愈与外源自愈的两条技术路径。

截至目前，仿生自愈合技术在桥梁、地下工程、海洋工程、大型建筑以及极端环境工程等领域展开试点，现场应用验证证明该技术能延长结构寿命，降低维护成本，明显提升安全可靠，仿生自愈合技术在复杂环境和难于维护的工程结构中展现出远超传统修复方法的独到优势。

5.2 技术挑战分析

目前大多数自愈合技术仅能修补微观或局部损伤，面对大尺度损伤时修复效果明显受限，自愈过程在多变环境下表现出可靠性和重复性不足，多种损伤机制交互作用令技术面临更严峻考验，标准规范与评价体系对自愈合技术构成制约，缺乏统一评估自愈合材料及结构性能的标准使各项研究结果缺乏直接对比基础，工程设计、施工及维护环节尚未建立明确应用规范，该技术在工程推广中因此受到限制。

5.3 未来发展方向

未来的自愈合技术将不再局限于单一材料和构件，而是扩展作用于整体结构系统，形成多尺度、多层次交织的自愈合网络，通过采用仿生设计，构建出类似生物体的“循环系统”和“神经系统”，以推动修复资源的迅速输送、损伤信息的高效传递，在大型工程结构中构建模拟血管网的修复剂输送通道，确保修复剂能及时抵达受损部位，并在关键节点布置自愈合单元，构成结构安全的多重保障。

参考文献

[1]江艳萍. 房屋火灾后结构损伤及整体可靠性的判断、分析与评价[J]. 安徽建筑, 2025, 32(03): 184-187.
 [2]孟祥俊. 建筑工程混凝土结构损伤检测技术要点分析[J]. 建材发展导向, 2025, 23(04): 16-18.
 [3]李科, 聂志虎, 戴璐雅. 钢筋混凝土桥梁无损探伤检测系统研究[J]. 建筑机械化, 2025, 46(02): 100-103.
 [4]王新舟. 型钢混凝土组合结构施工技术研究[J]. 砖瓦, 2025, (02): 165-168.
 [5]刘妍, 王茂岑, 张令心. 从 18WCEE 看基于 ML 的结构地震响应预测和损伤评估研究进展[J]. 世界地震工程, 2025, 41(01): 72-89.