

基于自愈合材料的市政道路裂缝智能修复技术研究

胡美红

江西饶州建设工程有限公司 江西上饶 333199

摘要: 基于自愈合材料的市政道路裂缝智能修复技术,为解决传统道路养护被动、低效的问题提供了创新方案。该技术核心在于应用具备自主修复能力的材料,主要包括基于微胶囊、血管网络和本征型三种类型。微胶囊型材料通过裂缝触发破裂释放愈合剂实现修复,但多为单次作用;血管网络型材料通过内部通道输送愈合剂,可支持多次修复;本征型材料则依靠自身分子结构的可逆反应实现无限次愈合,但受环境条件影响较大。其修复机理遵循“裂缝触发-愈合剂释放-固化-界面强化”的连续过程,最终恢复裂缝处的力学性能。在应用层面,需解决自愈合材料与沥青混合料的融合技术,优化施工工艺与质量控制,并建立包含实验室力学性能测试与现场长期观测的评估体系。该智能修复技术能够显著延长道路使用寿命,降低养护成本,提升市政道路的服务水平与耐久性。

关键词: 自愈合材料;市政道路;裂缝修复;智能修复

引言

市政道路作为城市基础设施的重要组成部分,长期承受着车辆荷载、温度变化及环境侵蚀的循环作用,裂缝的产生与发展是其最常见的病害形式。传统的裂缝修复方法多为被动式的外部填补,不仅修复效果有限、耐久性差,且需要频繁的人工干预,养护成本高昂。随着材料科学与智能技术的发展,自愈合材料作为一种能够主动感知损伤并自主修复的新型功能材料,为道路裂缝的智能修复开辟了全新的路径。它有望将道路养护从“亡羊补牢”式的被动维修,转变为“防患未然”式的主动防护。因此,深入研究自愈合材料的类型特性、修复机理及其在市政道路中的应用技术,对于推动道路工程向智能化、长寿命化发展具有重大的理论价值与深远的现实意义。

一、用于道路修复的自愈合材料类型与特性

适用于市政道路裂缝修复的自愈合材料,需要与道路基质(如沥青混合料、水泥混凝土)的力学特性及其服役环境相适配。按照修复机制的不同,这类自愈合材料可以分为三大类,每一类在组成成分和性能表现上都存在着显著的差异。

(一) 基于微胶囊的自愈合材料

基于微胶囊的自愈合材料主要由微胶囊的内核和壁材两部分构成。内核部分封装了愈合剂,常见的愈合剂包括环氧树脂和聚氨酯等;而壁材则选用具有一定力学

强度的聚合物,如脲醛树脂和聚甲基丙烯酸甲酯等。这类材料的核心特性在于其触发响应的灵敏性。当道路表面出现裂缝时,裂缝扩展过程中产生的机械力会挤压并导致微胶囊破裂,封装在内的愈合剂在毛细作用和重力的共同作用下流出,填充到裂缝区域,并与道路基质发生化学反应,从而实现裂缝的修复。

这类材料的制备工艺相对简单,可以通过物理包覆法进行批量生产,并且具有较好的兼容性,能够与沥青混合料、水泥混凝土等多种道路基质混合使用。然而,由于壁材强度的限制,微胶囊在道路施工过程中的搅拌和压实环节容易提前破裂,导致愈合剂失效。此外,单颗微胶囊只能实现单次愈合,对于多次开裂的裂缝,其修复效果较为有限^[1]。

(二) 基于血管网络的自愈合材料

基于血管网络的自愈合材料借鉴了生物体内血管输送营养的机制,在道路基质内部构建了一个相互连通的微通道网络,这些通道内储存了愈合剂和固化剂。其突出的特性在于能够实现多次愈合。当裂缝首次出现时,通道破裂释放出愈合剂和固化剂,二者混合反应完成修复;如果同一位置再次开裂,周边未破损的通道可以继续输送修复物质,持续发挥修复作用。

这类材料的愈合效率较高,微通道网络能够迅速将愈合剂输送至裂缝的各个部位,特别适用于较长裂缝的修复。但是,其制备工艺较为复杂,需要在道路浇筑或铺设过程中精准植入微通道,对施工精度提出了较高要

求；此外，微通道的存在会在一定程度上影响道路基质的整体力学性能，因此需要严格控制通道的直径和分布密度。

（三）基于本征型自愈合的材料

基于本征型自愈合的材料无需额外封装愈合剂，其自身的分子结构具备可逆反应能力。常见的类型包括基于动态共价键（如席夫碱键、二硫键）和非共价键（如氢键、范德华力）的自愈合材料。其核心特性在于修复过程的环保性和可持续性。当道路产生裂缝时，在环境条件（如温度、湿度）或外部轻微刺激的作用下，材料分子链通过可逆键的断裂与重组，实现裂缝的自主愈合。

这类材料与道路基质的融合性较好，不会因为添加异物而影响基质的性能，并且能够实现无限次愈合，适应道路长期服役的需求。然而，受可逆反应条件的限制，其愈合速度相对较慢，在低温、干燥等极端环境下修复效果会显著下降；同时，材料的力学强度与自愈合性能难以兼顾，高强度材料往往自愈合效率较低^[2]。

二、自愈合材料修复道路裂缝的作用机理

自愈合材料修复市政道路裂缝的过程遵循着“触发-释放-固化-强化”的连续反应机制，这一系列环节环环相扣、紧密衔接，最终实现裂缝区域力学性能的有效恢复。要深入理解这一修复过程的内在机理，需要从触发机制、固化过程与强度恢复三个关键维度进行系统解析。

（一）裂缝的产生与扩展对材料的触发机制

裂缝的产生与扩展是启动自愈合修复过程的核心触发信号，不同类型的自愈合材料虽然具有各自的触发机制，但都依赖于裂缝扩展过程中产生的物理作用或环境响应。对于微胶囊型自愈合材料而言，当市政道路在车辆荷载反复作用或温度应力变化影响下产生裂缝扩展时，裂缝尖端区域会产生显著的机械应力集中现象，这种应力会作用于周围的微胶囊壁材。当局部应力超过壁材的断裂强度阈值时，壁材结构会发生破裂，从而为内部封装愈合剂的释放提供了必要的通道。对于血管网络型自愈合材料，裂缝在扩展过程中会直接撕裂其路径上的微细通道网络，破坏原有通道的封闭结构完整性，使得内部储存的液态愈合剂与固化剂在系统压力差的作用下向裂缝区域定向流动。而对于本征型自愈合材料，裂缝的产生会破坏材料分子间的可逆动态键连接，同时裂缝界面的紧密接触会促进分子链的相互扩散与结构重组，在适宜的环境条件刺激下自主启动自愈合反应过程^[3]。

（二）愈合剂的释放与固化过程

愈合剂的有效释放与充分固化是裂缝修复过程的核心环节，这一阶段的完成质量直接决定了整个修复过程的效率与效果。在微胶囊型材料体系中，当壁材发生破裂后，内部封装的愈合剂通过毛细管渗透效应与重力作用的共同影响，逐步填充裂缝形成的空隙区域。如果采用双组分愈合剂体系（如将环氧树脂与固化剂分别封装在不同的微胶囊中），则两种成分在裂缝内部混合后会发​​生交联固化反应，从初始的液态逐渐转变为固态，最终形成致密完整的修复层。血管网络型材料的愈合剂释放过程具有更好的靶向性，其连通的微通道网络能够确保愈合剂快速、均匀地覆盖整个裂缝区域，固化反应通常采用自由基聚合或缩聚反应机制，反应速率受环境温度影响较为显著。在市政道路常见的10-35℃环境温度范围内，完全固化所需时间一般为24-72小时。本征型材料则无需额外的愈合剂释放步骤，裂缝产生后，材料内部的分子链在可逆化学键作用下自主进行扩散运动，通过化学键的断裂与重组实现界面融合，固化过程受环境湿度影响较大，当相对湿度维持在40%-60%范围内时固化效果达到最佳状态。

（三）修复后界面的粘结与强度恢复机理

修复后界面的粘结质量与强度恢复程度，是衡量自愈合材料修复效果的关键性能指标，其内在作用机理与材料类型选择及道路基质特性密切相关。对于微胶囊型与血管网络型材料而言，固化后的愈合剂与道路基质界面会形成双重粘结作用机制：一方面，愈合剂分子与基质表面的活性官能团发生化学反应，形成牢固的化学键连接；另一方面，愈合剂在固化过程中会渗入基质表面的微小孔隙结构，形成机械互锁的物理嵌合结构，从而显著提升界面粘结强度。强度恢复性能主要依赖于所选愈合剂固化后的力学特性，如果选用与道路基质力学性能相匹配的愈合剂体系（如沥青混合料修复时选用柔性聚氨酯类愈合剂），修复后的界面强度通常可达到原基质强度的60%-80%。对于本征型自愈合材料，强度恢复源于分子链的重新交联作用，修复后的材料内部结构趋于均匀完整，力学性能逐步回升，在实验室理想条件下强度恢复率可达90%以上，但在实际道路使用环境中，受交通荷载与外界环境因素的复合影响，强度恢复率通常维持在70%-85%的范围内。

三、自愈合材料在市政道路中的应用技术

自愈合材料在市政道路中的应用需解决“材料融

合-施工控制-效果评估”三大核心问题，结合工程实践形成标准化技术路径，确保修复效果稳定可靠。

（一）自愈合材料与沥青混合料的融合技术

自愈合材料与沥青混合料的融合质量，直接影响道路的力学性能与自愈合效果，需重点控制材料掺量与混合工艺。对于微胶囊型材料，通常采用“干拌法”融合，先将微胶囊与沥青混合料骨料混合搅拌2-3分钟，使微胶囊均匀分散在骨料间隙，再加入热沥青继续搅拌4-5分钟，微胶囊掺量控制在混合料质量的3%-5%为宜。某市政道路改造项目中，采用该融合技术制备的沥青混合料，裂缝宽度0.5mm以内时，自愈合率达75%，较普通沥青混合料提升40%。

对于本征型自愈合材料，多采用“湿法改性”工艺，将自愈合单体与沥青在150-160℃下加热搅拌，使单体与沥青分子发生接枝反应，形成改性沥青，再与骨料混合制备混合料，单体掺量为沥青质量的8%-12%。该技术能提升沥青混合料的柔韧性，减少低温开裂风险，同时赋予其自愈合能力。融合过程中需严格控制搅拌温度，避免温度过高导致自愈合材料提前反应失效^[4]。

（二）自愈合材料的施工工艺与质量控制

自愈合材料的施工工艺需适配市政道路的施工流程，同时建立全流程质量控制体系。在新建道路施工中，微胶囊型自愈合材料可直接融入沥青混合料，按常规热拌沥青施工工艺铺设，碾压温度控制在130-150℃，碾压次数不少于3遍，确保混合料压实度达标，同时避免碾压过度导致微胶囊破损。施工过程中需每批次抽样检测混合料中的微胶囊完好率，确保完好率不低于85%。

在既有道路裂缝修复施工中，可采用“注入法”施工，对于宽度0.3-1.0mm的裂缝，先清理裂缝内的杂物与灰尘，再将血管网络型自愈合材料的愈合剂通过高压注入设备注入裂缝，注入压力控制在0.3-0.5MPa，确保愈合剂充满裂缝。施工后需在裂缝表面覆盖防渗膜，防止雨水冲刷影响固化效果，养护时间不少于48小时，养护期间禁止车辆通行。质量控制重点包括注入压力监测与养护效果检查，避免因压力不足导致愈合剂填充不充分。

（三）修复效果的评估与性能检测方法

修复效果的评估需结合实验室检测与现场观测，建立多维度评价体系。实验室检测主要包括力学性能与自愈合率测试：采用万能试验机测试修复后沥青混合料的劈裂强度与抗压强度，评估力学性能恢复程度；通过人

工制造裂缝，经自愈合后再次测试强度，计算自愈合率（修复后强度与原强度的比值）。某检测数据显示，掺加微胶囊自愈合材料的沥青混合料，经过2次自愈合后，劈裂强度自愈合率达72%，满足市政道路使用要求。

现场观测主要针对实际道路工程，定期检测裂缝宽度变化与路面平整度，观测周期为1-2年，记录不同时间段的自愈合情况。检测指标包括裂缝闭合率（自愈合后裂缝宽度与初始宽度的比值）、路面行驶质量指数（PQI）。某已投入使用的自愈合材料道路路段，通车1年后，初始宽度0.8mm的裂缝闭合率达68%，PQI指数维持在85以上，优于同期铺设的普通沥青道路。此外，还需检测修复界面的耐久性，通过冻融循环试验模拟环境侵蚀，确保修复后的界面在极端环境下仍能保持稳定性能^[5]。

结语

基于自愈合材料的市政道路裂缝智能修复技术，代表了道路养护理念的一次深刻变革，它将材料的“生命特征”赋予了冰冷的路面，使其具备了自我修复的能力。从微胶囊的精准触发，到血管网络的持续供给，再到本征型材料的无限循环，每一种技术路径都展现了材料科学的智慧与潜力。通过科学的融合技术、精细化的施工工艺和可靠的评估体系，这些前沿材料正逐步从实验室走向实际工程，为解决道路养护难题提供了强有力的武器。展望未来，随着材料性能的不断优化和成本的逐步降低，自愈合材料有望成为市政道路的标准配置，推动道路基础设施向着更安全、更耐久、更智能的方向迈进，为城市的可持续发展贡献重要力量。

参考文献

- [1]朱兴一,鲁乘鸿,戴子薇,等.土木工程材料自愈合行为的若干力学问题与研究进展[J].科学通报,2021. DOI: 10.1360/TB-2020-1082.
- [2]吴欣桐.化学固化海洋侵蚀性离子的水泥基材料裂缝自修复研究[D].华南理工大学,2020.
- [3]石达,史才军,吴泽媚,等.基于水泥基材料组分的自愈合研究进展[J].材料导报,2021(007):035.
- [4]郑乔木,何倍,李晨,等.超高性能混凝土裂缝自愈合研究进展[J].硅酸盐学报,2021(011):049.
- [5]王大鹏.室温快速自修复材料的设计,合成及应用研究[D].南京大学,2021.