

新型高性能建筑材料在城市道路耐久性提升中的应用研究

文 / 刘春梅 山东鲁勘集团有限公司

邢金水 山东鲁勘集团有限公司

摘要：城市道路的建设与维护一直是城市基础设施建设的重要组成部分。然而，由于交通流量的不断增加、气候条件的复杂性以及材料老化等因素，传统道路材料的耐久性问题日益突出。近年来，随着建筑材料技术的创新发展，新型高性能建筑材料逐步应用于城市道路建设，其在抗裂、耐磨、抗疲劳及自修复等方面表现出优越性能。本文围绕高性能混凝土（HPC）、改性沥青、纤维增强复合材料（FRP）、高强度聚合物以及智能自修复材料的应用进行研究，探讨其在提高城市道路耐久性方面的作用，并分析实际工程中的应用案例，为延长道路使用寿命并降低维护成本提供参考性意见。

关键词：高性能建筑材料；城市道路；耐久性

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.15.051

引言

城市的不断扩大对城市道路交通的要求也越来越高，城市道路的修筑和养护是城市基础设施建设的重点任务。交通荷载和极端气候条件越来越频繁，同时城市路面负荷也逐渐增大，道路的持久性与使用寿命成为迫切需要解决的问题。新型高性能材料在城市道路建设领域的工程应用，是利用材料科技改进和工程上的有效应用，提高道路路面的整体能力、耐久性，并降低道路交通长期养护的成本，这种创新技术成为道路工程建设的技术趋势。近年来高性能混凝土（HPC）、聚合物改性沥青、纤维增强复合材料（FRP）以及道路工程智能自修复等技术获得较大发展，各种新型高性能材料具有较强的强度—轻重比、抗腐蚀和自修复能力，充分弥补了传统建筑材料的耐久性弊端。其中，HPC 掺入纳米材料、矿物掺合料，提高抗开裂性和耐久性，被应用于荷载强度更大的道路，如桥梁、隧道及高速公路等；聚合物改性沥青借助聚合物、纳米技术提高其抗车辙能力、抗裂的能力，使路面更为平稳及耐久；FRP 轻而强度极高、耐腐蚀能力强，被广泛应用于路面基层加固、桥梁结构的增强等方面。

一、新型高性能建筑材料的特点与类型

（一）特点

传统建筑材料相比于新型高性能建筑材料，力学性能较差，抗压、抗拉和抗弯性能不足，耐久性、智能化程度和环境适应性不够，而新型高性能建筑材料则具有以下优势：对材料的力学性能，如抗压、抗拉、抗弯等方面较传统建筑材料更优秀，如高强高性能混凝土（HPC），是通过配合比改善和引入纳米材料后的建筑材料，高强高性能混凝土具有优秀的抗裂性和抗疲劳性能，利用特殊纤维材料制成的纤维增强复合材料（FRP）具有强度/重量的比率高，可以用于桥梁加固和道路基层，使得道路基底的强韧性达到极佳的水平；新型高性能建筑材料中，具有较高性能耐久性的特点，耐高温、低温、紫外

线的照射以及水的侵蚀，即耐候性较强的改性沥青、高分子聚合物材料，在各种气候环境中使用情况依旧较好，没有过度的老化和开裂现象，而智能自修复材料的出现使道路建筑材料拥有了自我修复的能力，如微胶囊自修复沥青、纳米自修复混凝土可利用材料本身的缺陷，即出现裂缝后，自行封堵裂缝，既降低维护的成本又增加道路的使用年限；还有部分新型高性能建筑材料具有很好的环保性，如低碳水泥、可再生性的聚合物材料、透水混凝土等，降低碳的排放，使城市生态环境得到改善。

（二）类型

1. 高性能混凝土（HPC）

HPC 主要是指在普通混凝土的基础上对混凝土进行更优化组合后所添加的强度较大矿物掺合料、化学外加剂，来提高混凝土的耐久性及强度的一种混凝土材料。与普通混凝土比较，HPC 在抗压强度、抗拉强度以及抗弯强度上均显著增强，而且其内部密实的微观结构使其渗透率得以降低，抗水分侵蚀及碳化效果、抵御硫酸盐腐蚀等能力均获得相应的提升。在混凝土中，通常使用硅灰、矿渣微粉、粉煤灰等高强度的掺合材料来提高水泥混凝土的强度，还可减少水泥使用量，从而减少 CO₂ 的排放，增强材料的环保性。除此之外，使用纳米技术来改善水泥混凝土，还可以进一步提升水泥混凝土的抗开裂能力，如纳米 SiO₂ 或纳米碳管添加进水泥混凝土中可以提升混凝土的结合面，使其在高负荷情况下具备稳定性。通常使用 HPC 建造桥梁、高速路、隧道及机场跑道等要求具有高耐久性的基础设施，以增强基础设施的使用寿命，减少未来的维修和维护成本。

2. 改性沥青及其混合料

改性沥青是将一些聚合物、纳米材料或者纤维增强剂掺入沥青混合料中以改善沥青混合料的性能。传统的沥青因温度敏感性较大，高温下易产生软化、低温环境下易发生脆裂现象而引发路面车辙、裂缝等问题，改性

沥青可以有效增强沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性及路面抵抗水损坏的能力。最常用聚合物改性剂主要有 SBS(苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物)、SMA(间歇级配沥青混合料)和 EVA(乙烯-醋酸乙烯共聚物),这些聚合物均能增强沥青的黏结性和弹性,使道路材料在任何恶劣的气候环境下均能保持良好的使用性;纳米级材料改性的沥青,如纳米碳管、纳米硅粉等的添加,能使沥青的抗老化性能得到进一步增强,更少地产生裂开及疲劳破坏等情况。

3. 纤维增强复合材料(FRP)

纤维增强复合材料(以下简称 FRP)是将高强度纤维(碳纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维)与合成树脂基体复合成一种纤维含量高、轻质高强度材料,具有比强度高、耐腐蚀、耐久性好等优势,被越来越多的用于建筑结构加固以及道路基础设施建设。FRP 材料密度小于普通钢筋,但抗拉强度是普通钢筋的 5~10 倍,同时耐腐蚀,可以解决传统钢材由于在潮湿环境中容易发生锈蚀而产生的不可逆变化;玻璃纤维增强复合材料(以下简称 GFRP)具有成本低、机械性能好等优点,被大量应用于桥梁防护、隧道衬砌以及道路基层加固之中。近年来,铺设轻量化桥面、高速公路护栏、排水沟盖板等也都开始用 FRP 材料代替以往传统的材料,提高了工程的耐久性及其使用寿命。

4. 智能自修复材料

智能自修复材料是指修复材料出现裂缝后,可以对裂缝、孔隙进行自修复,避免了频繁的维修工作,延长了其使用寿命。智能自修复材料主要包括微胶囊自修复混凝土材料、沥青自修复、聚合物纳米自修复等。微胶囊自修复混凝土主要是将含有修复剂的微胶囊材料嵌入在混凝土水泥基体中,当混凝土裂缝出现时,微胶囊破碎,释放修复剂,修复混凝土裂缝,保证混凝土的完整性,同时修复剂能够防止材料产生裂缝或扩大。沥青的自修复主要是采用与微胶囊修复同样的原理,当沥青出现裂缝时,释放沥青或者高分子,然后修复道路开裂处,避免其继续延伸。而纳米自修复聚合物材料,例如纳米 SiO₂ 材料及纳米 TiO₂ 增强的水泥材料,在自修复方面属于早期修复,在微裂纹生成时可以对材料进行自修复,降低材料内部应力累积的风险,提高材料的耐久性。

二、新型高性能建筑材料在城市道路耐久性提升中的应用策略

(一) 优化材料配比与改性技术,提升道路材料性能

由于城市道路交通频繁且车流量大,所以采用的建筑材料品质必须高,对于原材料中能够通过最佳配比改善材料性能及采用改性技术等提高城市道路性能也

是城市道路性能优化的重要途径。在水泥混凝土和沥青混合料等传统路面材料中,如使用常规道路配比方式,常会出现抗裂性能不足、耐磨耗性能差、道路材料疲劳寿命低等诸多劣势,而使用高性能新型建筑材料通过合理配比以及采用改性材料进行性能补强和提升,将城市道路材料的整体性能提高较多,在城市主干道及桥梁路面上更适合车辆的重载使用。对于高荷载、重使用性质的城市道路基层常用配比高性能混凝土(HPC)中的水胶比、高强度矿物掺和料、纳米材料(包括 SiO₂ 纳米粉材料和碳纳米管等)进行材料配比,调整改善水胶比,掺入高强度的矿料如粉煤灰等、复合材料,加入纳米材料,对于路面的强度、抗裂性能等可显著增强路面混凝土的抗压强度、耐久性能等方面。改性沥青的大量使用主要是加入聚合物改性材料,对于沥青的黏度进行增强,如加入 SBS(苯乙烯-丁二烯-苯乙烯)、SMA(间歇级配沥青混合料)等进行路面性能的强化,结合抗高低温开裂、车辙性能提升与防水等工程性指标的改良,可解决道路在路面黏结力、抗车辙能力等问题。纳米材料改性沥青路面材料,如加入纳米碳材能够增强沥青的黏结性等可增强路面的抗磨耗性能,同时通过纳米增强,可提升其耐磨性及沥青材料抗老化性。采用新型改性材料的道路因在恶劣气候中可使用较长的时间,避免城市道路频繁维修带来的巨大经济损失及交通拥挤。

(二) 推广智能自修复材料,提高道路维护效率

智能自修复型材料是未来城市建设道路发展的重要方向,通过应用这种道路材料可以降低道路维护保养成本,延长道路寿命,增加道路整体耐久性。传统路面在长期使用中,道路会出现裂缝、车辙、坑槽等各种情况,而智能自修复型材料通过早期即可自行修复微裂缝,防止损伤发生继续,减少维护情况,如微胶囊自修复沥青,它是将微小修复剂胶囊嵌入沥青材料中,在道路出现裂缝时微胶囊破裂释放修复剂,使沥青重新黏合,自修补裂缝,提升沥青路面的抗疲劳性等。基于智能化技术的道路故障破损识别算法流程如图 1 所示。

智能自修复材料,例如掺入了钙基类自修复材料(如碳酸钙沉积型细菌),在裂缝暴露之后促进自愈,使混凝土路面恢复原始状态。这类材料的推广可以减少对城市道路的多次修复,减少人工维护修复的成本,提高道路利用率。智能自修复材料也还可以应用结合物联网技术进行动态监测例如嵌入式传感器来对道路裂缝,沉降,疲劳损伤进行监测在损伤超过一定的阈值时,启动修复机制,实现智能化,自动化的道路维护工作。总体来说应用智能自修复材料,结合当下监测技术,能够提高道路的耐久性能,降低道路维修的成本,提高城市基础设施的可持续性水平。

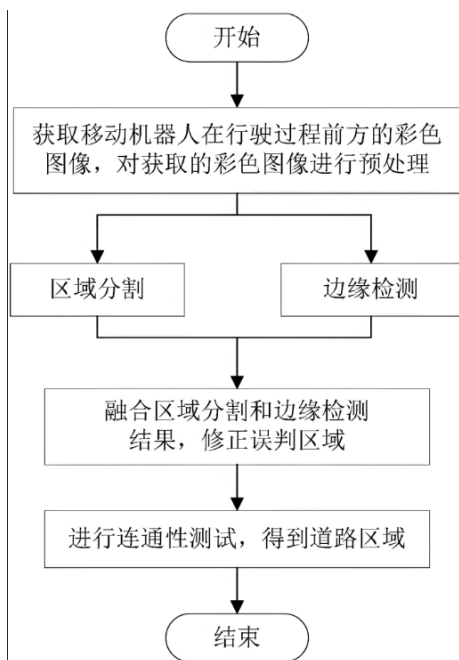


图1 基于智能化技术的道路故障破损识别算法流程

(三) 采用新型结构设计 with 绿色施工技术, 提升道路耐久性

合理的结构设计和绿色施工技术在城市道路结构耐久性设计中也是不容忽视的设计措施。常规的道路结构在长期行车作用下容易因道路结构的不均匀沉降、温度应力的变化而在道路结构中出现裂缝或破损情况, 通过改进道路结构设计方式有利于提高道路的使用耐久性。例如, 通过增加道路基层材料的透水性能设计, 应用高强度透水混凝土在道路基层结构中, 在透水性能和强度方面都有所提高, 不仅可以防止雨水对道路结构的侵蚀性影响, 还可以有效减少热胀冷缩对道路结构造成的损伤。通过采用纤维增强复合材料 (FRP) 技术对道路结构进行加固处理, 可使路面抗拉力获得提升, 抗载车辆冲击性能较好。同时绿色施工技术中, 如温拌沥青技术 (WMA), 应用该技术可在沥青混合料拌和之后的低温条件下, 进行沥青混合料的摊铺和压实处理, 有效减少施工建设过程的能源消耗量, 减小沥青施工的环境温度, 能有效避免沥青老化问题出现, 提高道路的疲劳使用性能。

除了在建筑工程领域以外, 近期 3D 打印房屋技术也开始逐渐应用于道路建设, 比如通过 3D 打印技术的路面基层结构强度更优, 道路整体稳定性会更好。另外在 3D 打印技术基础上, 还可以配合透水性沥青等技术, 进而形成城市道路交通的高效排水系统, 降低城市道路积水带来的路面结构毁坏问题, 增加道路建设的耐久性能。可见综合优化设计路面结构并搭配绿色施工技术能够在较大程度上提高城市道路的稳定耐久性, 降低道路建设后期维护成本, 使城市道路交通设施更加绿色高效。

(四) 推动新型材料的标准化与工程应用, 提高技术推广力度

目前, 有些优质的新型建筑材料实验室效果良好, 在施工工程中却缺少配套的技术标准与施工规程, 导致在工程中大规模推广困难。因此, 新型材料工程建设中应当构建科学完整的新材料技术、检测评定及工程技术使用标准体系, 实现推动新型材料工程化的进程, 并提升材料工程技术施工效率和使用寿命。如高性能混凝土 (HPC)、改性沥青、智能自修复材料需要在气候、荷载和使用过程中长期的连续测试和基于大数据分析的工程结构服役寿命预测模型, 获得基于实际道路运营环境中统一材料寿命使用工程技术标准; 同时政府及各行业、协会应该制定鼓励材料推广应用的措施, 通过实施新型材料应用试点工程、建立示范基地, 施工实践过程中积累数据, 为新型材料推广做好数据支持。加强新建成品材料的培训和技术管理, 增强施工人员的新型材料相关技术认知和使用, 以保证工程使用的混凝土等施工材料工程质量符合设计要求。在未来可以开展建立材料数据库、智能建材管理等技术手段, 对新型建筑材料进行全寿命周期管理, 从生产开始直至施工、养护全过程的数据记录管理, 更好地提高新材料的使用效能和工程质量。

结语

随着各种新型高性能新型建筑材料的广泛应用, 城市道路的发展趋势正在向高品质、长寿命、智能化方向迈进。随着交通负载的日益增长和极端环境的日益加剧, 传统的材料结构由于其使用寿命等原因限制导致其在道路建设中的不足日益突显, 而高性能混凝土材料、改性沥青材料、纤维增强复合材料、智能自修复材料等新材料的应用, 使得新材料代替传统道路材料在道路建设中的作用和效果更为突出。不仅在道路的耐久性、抗折性、抗疲劳性、抗裂性以及抗腐蚀性、耐老化方面都显示出非常好的性能和效果。

参考文献

- [1] 马伟波. 新型高性能复合材料在建筑工程中的应用及性能分析 [J]. 石材, 2025, (02): 126-129.
- [2] 赵莹, 王建荣. 新型材料在建筑和公路桥梁设计及检测中的应用 [C]//《中国建筑金属结构》杂志社有限公司. 2024 新质生产力视域下智慧建筑与经济发展论坛论文集 (四). 哈尔滨市建筑工程研究设计院有限公司; 北京特希达科技有限公司; 2024: 189-190.
- [3] 杨丽芳. 新型高性能建筑保温材料设计与性能探究 [J]. 建材发展导向, 2024, 22 (18): 13-15.
- [4] 张爱良. 新型混凝土材料在建筑工程项目中的应用研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2024, (17): 109-111.
- [5] 任秋荣, 叶龙, 李向召. 土木工程发展现状及趋势 [J]. 制造业自动化, 2011, 33 (12): 150-152.