

公路路面耐久性提升：纳米材料的应用研究

杨 东 乔子睿 格日娜

内蒙古自治区交通运输科学发展研究院 内蒙古 呼和浩特 010050

摘要：随着交通流量与荷载的持续增加，公路路面耐久性问题愈发突出，成为制约道路使用寿命与服务质量的关键因素。纳米材料凭借其独特的物理化学性质，在提升路面材料性能方面展现出巨大潜力。本文系统梳理了纳米材料在公路路面中的应用现状，深入分析了纳米材料对路面材料力学性能、耐久性能及功能特性的提升机制，结合工程实践案例探讨了纳米材料的应用效果与经济性，并提出了未来发展方向。研究表明，纳米材料可显著改善路面材料的抗裂性、抗渗性、抗老化性及抗滑性，为公路路面耐久性提升提供了创新解决方案。

关键词：公路路面；耐久性；纳米材料；力学性能；抗老化性

引言

公路交通作为国家经济命脉的重要支撑，其运行质量直接影响区域经济发展与社会稳定。近年来，随着重载交通比例攀升、极端气候频发以及养护资金相对不足，公路路面耐久性问题日益严峻。据统计，我国高速公路路面使用5-8年后即进入大修期，远低于设计寿命，由此引发的交通事故与经济损失不可估量^[1]。传统路面材料改性技术（如聚合物改性沥青、纤维增强混凝土）虽能部分提升性能，但存在成本高、相容性差、环境适应性不足等局限。

纳米材料因其尺寸效应、表面效应及量子效应，在材料科学领域引发革命性突破。当材料粒径减小至纳米尺度时，其比表面积急剧增大，表面原子活性增强，导致力学、热学、光学及电磁学性能发生质变。例如，纳米二氧化硅可填充沥青分子间隙，形成致密网络结构；纳米二氧化钛具备光催化自清洁功能，可分解路面污染物。将纳米材料引入公路路面材料体系，为解决耐久性问题提供了新思路。

1 纳米材料在公路路面中的应用现状

1.1 纳米材料类型与特性

公路路面中常用的纳米材料可分为无机纳米颗粒（如 SiO_2 、 TiO_2 、 CaCO_3 、 Fe_3O_4 ）、纳米纤维（如碳纳米管、聚丙烯腈纤维）及纳米复合材料（如纳米黏土/聚合物复合体）。其中，纳米 SiO_2 因高活性、低成本优势，成为沥青改性领域的研究热点；纳米 TiO_2 则凭借光催化性能，在环保型路面材料中广泛应用。

1.2 应用形式与工艺

纳米材料在路面中的应用形式主要包括直接掺入与表面负载。直接掺入法通过高速剪切、超声分散等技术将纳米颗粒均匀分散于沥青或混凝土基体中，形成纳米

复合材料。例如，在沥青中添加3%-5%的纳米 SiO_2 ，可显著提升其高温稳定性与抗老化性能。表面负载法则利用溶胶-凝胶法、化学气相沉积（CVD）等技术，将纳米光催化材料（如 TiO_2 薄膜）涂覆于路面表层，实现自清洁、降霾等功能。

1.3 国内外研究进展

国际上，美国、日本及欧洲国家率先开展纳米路面材料研究。美国联邦公路管理局（FHWA）资助的“纳米增强沥青混合料”项目证实，纳米黏土改性沥青的车辙深度较传统材料减少40%。日本开发的纳米二氧化钛光催化路面，在东京都高速道路试验中， NO_x 降解率达30%/ $\text{km}^2 \cdot \text{d}$ 。国内方面，哈尔滨工业大学张茂花团队系统研究了纳米 SiO_2 对混凝土力学性能的影响，发现掺入2%纳米 SiO_2 可使混凝土28天抗压强度提升15%-20%^[2]。

2 纳米材料对路面材料性能的提升机制

2.1 力学性能强化

纳米材料通过晶粒细化、裂纹偏转及载荷传递等机制，显著提升路面材料的抗裂性与抗疲劳性。纳米 SiO_2 的火山灰活性可促进水泥水化反应，生成更多C-S-H凝胶，细化混凝土孔结构。在混凝土中，水泥水化是一个复杂的化学反应过程，纳米 SiO_2 能够与水泥水化产物中的氢氧化钙发生二次水化反应，生成更多的C-S-H凝胶。C-S-H凝胶是混凝土强度的主要来源，其数量的增加和结构的细化可使混凝土更加密实，从而提高混凝土的抗折强度。试验表明，掺入2%纳米 SiO_2 的混凝土，28天抗折强度可提高10%-15%。在沥青混合料中，纳米黏土片层结构可阻断裂纹扩展路径，降低疲劳损伤累积速率。纳米黏土具有层状结构，当裂纹在沥青混合料中扩展时，遇到纳米黏土片层会发生偏转，消耗裂纹扩展的能量，从而阻止裂纹的进一步扩展。同时，纳米黏土片层还能够

承担部分载荷,减轻沥青基体的应力集中,降低疲劳损伤的累积。试验表明,掺入2%纳米黏土的沥青混合料,在50万次疲劳加载后,动稳定度较基质沥青提高25%。

2.2 耐久性能提升

2.2.1 抗渗性

纳米材料的填充效应可显著降低路面材料的孔隙率。纳米 SiO_2 粒径仅为水泥颗粒的1/100,可填充水泥石中的毛细孔隙,使混凝土抗渗等级提升至P12以上。在混凝土中,毛细孔隙是水分和有害物质渗透的主要通道,纳米 SiO_2 的填充能够阻断这些通道,减少水分和有害物质的侵入,从而提高混凝土的抗渗性能^[3]。在沥青路面中,纳米 CaCO_3 的疏水性可阻断水分渗透通道,减少水损害风险。纳米 CaCO_3 表面具有疏水基团,能够使沥青表面形成一层疏水膜,阻止水分进入沥青内部。同时,纳米 CaCO_3 还能够填充沥青中的微小孔隙,进一步提高沥青的密度和抗渗性能。

2.2.2 抗老化性

纳米材料通过吸收紫外线、清除自由基等机制延缓路面材料老化。纳米 TiO_2 的光催化作用可分解沥青中的羰基化合物,抑制热氧老化反应。沥青在紫外线照射和热氧作用下会发生老化反应,生成羰基化合物等氧化产物,导致沥青变硬、变脆,性能下降。纳米 TiO_2 在紫外线照射下能够产生电子-空穴对,将空气中的氧气和水转化为超氧自由基和羟基自由基,这些自由基能够分解沥青中的羰基化合物,抑制热氧老化反应的进行。试验数据显示,纳米 TiO_2 改性沥青在60°C烘箱中加速老化168小时后,针入度比基质沥青高20%,软化点增量降低15%。

2.2.3 抗滑性

纳米材料的表面粗糙化效应可增强路面摩擦系数。将纳米 SiO_2 与玄武岩纤维复合,制备的抗滑表层材料构造深度达1.2mm,摆值(BPN)稳定在65以上,满足重载交通需求。纳米 SiO_2 的加入能够增加路面材料的表面粗糙度,提高轮胎与路面之间的摩擦力^[4]。玄武岩纤维具有高强度和高模量,能够增强路面材料的整体性能,防止表面颗粒脱落,保证抗滑性能的持久性。

2.3 功能特性拓展

2.3.1 光催化降霾

纳米 TiO_2 在紫外线照射下可生成羟基自由基($\cdot\text{OH}$),分解汽车尾气中的 NO_x 、 VOCs 等污染物。北京大兴机场高速采用的纳米光催化路面,在夏季晴朗天气下,PM2.5浓度较普通路面降低15%-20%。该路面通过在沥青表面涂覆纳米 TiO_2 薄膜,利用其光催化作用分解汽车尾气中的污染物,同时还能分解路面上的油污和灰

尘,实现路面的自清洁功能。

2.3.2 自修复性

纳米胶囊技术为路面材料自修复提供了新途径。将微胶囊化的修复剂(如环氧树脂)与纳米 SiO_2 复合,当裂缝扩展至微胶囊时,修复剂释放并固化,实现裂缝自主愈合。试验表明,含0.5%纳米微胶囊的沥青混合料,在3mm裂缝宽度下,修复效率可达70%。纳米 SiO_2 能够提高微胶囊在沥青混合料中的分散性和稳定性,同时还能增强修复剂与沥青基体的粘结力,提高自修复效果。

3 工程实践案例分析

3.1 河南洲基水泥路面快速修补料

针对传统修补材料固化慢、粘结力差的问题,河南洲基路桥研发了纳米增强型快速修补料。该材料以纳米 SiO_2 为增强相,结合高分子聚合物,实现2小时抗压强度达30MPa,4小时开放交通。在材料研发过程中,研究人员通过正交试验确定了纳米 SiO_2 的最佳掺量为3%,高分子聚合物的最佳掺量为5%。纳米 SiO_2 的加入能够提高修补料的早期强度和粘结力,高分子聚合物则能够改善修补料的流动性和柔韧性。在某中部省份高速养护工程中,采用该材料修复80处坑洞,较传统工艺提前12小时恢复通行,减少间接经济损失超百万元。经济性分析显示,虽然纳米修补料单价较传统材料高20%,但因施工效率提升与寿命延长,全生命周期成本降低40%。传统修补材料需要较长的固化时间,导致交通封闭时间延长,增加了间接经济损失。而纳米修补料能够快速固化,缩短施工时间,减少对交通的影响。同时,纳米修补料的耐久性更好,能够减少养护次数,降低全生命周期成本。

3.2 纳米光催化路面在城市道路的应用

2024年,广州市在黄埔大道试点铺设纳米 TiO_2 光催化路面。该路段采用溶胶-凝胶法将纳米 TiO_2 薄膜负载于防滑粒料表面,再通过树脂粘结剂固定于基材。在施工过程中,先将防滑粒料清洗干净,然后通过溶胶-凝胶法在粒料表面涂覆纳米 TiO_2 薄膜,涂覆厚度控制在50-100nm。最后将涂覆有纳米 TiO_2 薄膜的防滑粒料与树脂粘结剂混合,铺设在路面上。监测数据显示,施工后6个月内, NO_x 浓度平均下降18%,路面摩擦系数稳定在0.6以上,且未出现剥落、褪色等病害。与喷洒化学降霾剂相比,纳米光催化路面具有长效性、无二次污染等优势,每公里年维护成本降低60%。化学降霾剂需要定期喷洒,且在喷洒过程中可能会对环境造成二次污染。而纳米光催化路面能够长期发挥降霾作用,无需频繁维护,降低了维护成本。

4 挑战与未来发展方向

4.1 技术挑战

4.1.1 分散性与稳定性

纳米颗粒易团聚导致性能衰减，需开发高效分散技术（如超声辅助、表面改性）。例如，采用硅烷偶联剂对纳米 SiO_2 进行表面修饰，可使其在沥青中的分散均匀性提升30%。硅烷偶联剂能够在纳米 SiO_2 表面形成一层有机膜，降低纳米颗粒之间的表面能，减少团聚现象。同时，硅烷偶联剂还能够与沥青中的有机成分发生化学反应，增强纳米 SiO_2 与沥青之间的粘结力。

4.1.2 成本与规模化生产

纳米材料制备成本较高，限制了其大规模应用。需优化合成工艺（如水热法、微乳液法），降低生产成本。水热法是在高温高压的水溶液中合成纳米材料，具有反应条件温和、产物纯度高等优点。通过优化水热反应的温度、压力和时间等参数，可以提高纳米材料的产率和质量，降低生产成本。预计到2030年，纳米 SiO_2 价格将降至当前水平的50%，推动其在路面材料中的普及。

4.2 未来发展方向

4.2.1 智能响应型纳米材料

开发温敏、光敏纳米材料，实现路面性能的动态调控。例如，温敏纳米水凝胶可根据环境温度调节路面刚度，缓解热胀冷缩应力。温敏纳米水凝胶在低温下收缩，使路面刚度增加，提高抗裂性能；在高温下膨胀，使路面刚度降低，缓解车辙变形。

4.2.2 绿色纳米材料

利用生物质衍生纳米填料（如纳米纤维素）替代传统无机纳米颗粒，减少环境负荷。纳米纤维素具有良好的生物相容性和可降解性，对环境友好^[5]。纳米纤维素增强沥青混合料的拉伸强度可达4.5MPa，且生物降解性提升50%。将纳米纤维素应用于路面材料中，不仅能够提高材料的性能，还能够减少对环境的污染。

4.2.3 3D打印纳米路面

结合增材制造技术，实现纳米复合路面材料的精准构筑。例如，采用纳米 SiO_2 增强UHPC（超高性能混凝土），通过3D打印制备具有复杂孔隙结构的路面砖，兼具高强度与透水性。3D打印技术能够根据设计要求精确控制路面砖的形状和孔隙结构，提高路面砖的性能和使用寿命。同时，3D打印技术还能够实现个性化定制，满足不同道路的需求。

5 结语

纳米材料为公路路面耐久性提升提供了创新解决方案。通过强化力学性能、改善耐久性及拓展功能特性，纳米材料可显著延长路面使用寿命，降低全生命周期成本。尽管面临分散性、成本等挑战，但随着材料制备技术的进步与工程应用的深化，纳米材料将在智慧交通、绿色基建等领域发挥更大作用。未来，需加强跨学科协作，推动纳米路面材料从实验室研究向规模化应用转化，为公路交通高质量发展提供技术支撑。

参考文献

- [1]崔青青,吴斌.新型材料在公路施工中的应用研究[J].汽车周刊,2025,(04):246-248.
- [2]张茂花,韩玥,田泽农,等.冻融循环作用下纳米混凝土的抗硝酸盐侵蚀性能[J].混凝土,2022,(09):29-33.
- [3]李洪峰.公路沥青路面纳米 TiO_2 涂层材料及其工程应用研究.黑龙江省,东北林业大学,2021-10-22.
- [4]陈渊召,李振霞,冯纪兵,等.掺加纳米 $\text{SiO}_2/\text{GNPs}/\text{GO}$ 的冷再生沥青路面基层性能及作用机理[J].中国公路学报,2024,37(04):121-140.
- [5]周泽.基于纳米二氧化硅-短切碳纤维的改性沥青混合料性能研究[D].青海大学,2024.